This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

Über dieses Buch

Dies ist ein digitales Exemplar eines Buches, das seit Generationen in den Regalen der Bibliotheken aufbewahrt wurde, bevor es von Google im Rahmen eines Projekts, mit dem die Bücher dieser Welt online verfügbar gemacht werden sollen, sorgfältig gescannt wurde.

Das Buch hat das Urheberrecht überdauert und kann nun öffentlich zugänglich gemacht werden. Ein öffentlich zugängliches Buch ist ein Buch, das niemals Urheberrechten unterlag oder bei dem die Schutzfrist des Urheberrechts abgelaufen ist. Ob ein Buch öffentlich zugänglich ist, kann von Land zu Land unterschiedlich sein. Öffentlich zugängliche Bücher sind unser Tor zur Vergangenheit und stellen ein geschichtliches, kulturelles und wissenschaftliches Vermögen dar, das häufig nur schwierig zu entdecken ist.

Gebrauchsspuren, Anmerkungen und andere Randbemerkungen, die im Originalband enthalten sind, finden sich auch in dieser Datei – eine Erinnerung an die lange Reise, die das Buch vom Verleger zu einer Bibliothek und weiter zu Ihnen hinter sich gebracht hat.

Nutzungsrichtlinien

Google ist stolz, mit Bibliotheken in partnerschaftlicher Zusammenarbeit öffentlich zugängliches Material zu digitalisieren und einer breiten Masse zugänglich zu machen. Öffentlich zugängliche Bücher gehören der Öffentlichkeit, und wir sind nur ihre Hüter. Nichtsdestotrotz ist diese Arbeit kostspielig. Um diese Ressource weiterhin zur Verfügung stellen zu können, haben wir Schritte unternommen, um den Missbrauch durch kommerzielle Parteien zu verhindern. Dazu gehören technische Einschränkungen für automatisierte Abfragen.

Wir bitten Sie um Einhaltung folgender Richtlinien:

+ *Nutzung der Dateien zu nichtkommerziellen Zwecken* Wir haben Google Buchsuche für Endanwender konzipiert und möchten, dass Sie diese Dateien nur für persönliche, nichtkommerzielle Zwecke verwenden.

+ *Keine automatisierten Abfragen* Senden Sie keine automatisierten Abfragen irgendwelcher Art an das Google-System. Wenn Sie Recherchen über maschinelle Übersetzung, optische Zeichenerkennung oder andere Bereiche durchführen, in denen der Zugang zu Text in großen Mengen nützlich ist, wenden Sie sich bitte an uns. Wir fördern die Nutzung des öffentlich zugänglichen Materials für diese Zwecke und können Ihnen unter Umständen helfen.

+ *Beibehaltung von Google-Markenelementen* Das "Wasserzeichen" von Google, das Sie in jeder Datei finden, ist wichtig zur Information über dieses Projekt und hilft den Anwendern weiteres Material über Google Buchsuche zu finden. Bitte entfernen Sie das Wasserzeichen nicht.

+ *Bewegen Sie sich innerhalb der Legalität* Unabhängig von Ihrem Verwendungszweck müssen Sie sich Ihrer Verantwortung bewusst sein, sicherzustellen, dass Ihre Nutzung legal ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass ein Buch, das nach unserem Dafürhalten für Nutzer in den USA öffentlich zugänglich ist, auch für Nutzer in anderen Ländern öffentlich zugänglich ist. Ob ein Buch noch dem Urheberrecht unterliegt, ist von Land zu Land verschieden. Wir können keine Beratung leisten, ob eine bestimmte Nutzung eines bestimmten Buches gesetzlich zulässig ist. Gehen Sie nicht davon aus, dass das Erscheinen eines Buchs in Google Buchsuche bedeutet, dass es in jeder Form und überall auf der Welt verwendet werden kann. Eine Urheberrechtsverletzung kann schwerwiegende Folgen haben.

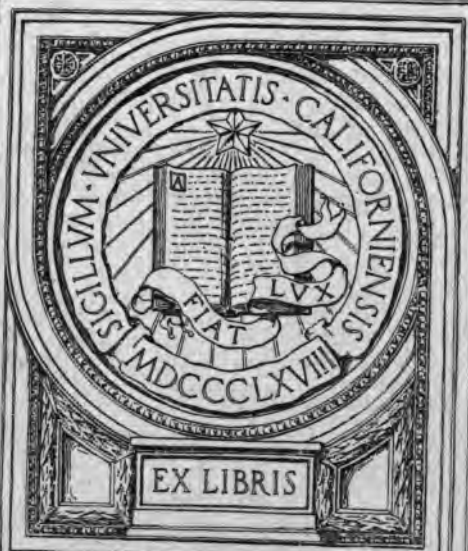
Über Google Buchsuche

Das Ziel von Google besteht darin, die weltweiten Informationen zu organisieren und allgemein nutzbar und zugänglich zu machen. Google Buchsuche hilft Lesern dabei, die Bücher dieser Welt zu entdecken, und unterstützt Autoren und Verleger dabei, neue Zielgruppen zu erreichen. Den gesamten Buchtext können Sie im Internet unter `http://books.google.com` durchsuchen.

QC
173
Z3

YB 27380

EXCHANGE


SIGILLVM · VNIVERSITATIS · CALIFORNIENSIS
LVX
FIAT
MDCCCLXVIII
EX LIBRIS

CHANGE
T 6 1913

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

Dr. A. Jart

Bausteine des Weltalls

Atome und Moleküle

Kosmos, Gesellschaft der Naturfreunde
Franckh'sche Verlagshandlung · Stuttgart

M 1.–

Bausteine des Weltalls

Atome und Moleküle

□ □

Kosmos, Gesellschaft der Naturfreunde, Stuttgart

Die Gesellschaft Kosmos will die Kenntnis der Naturwissenschaften und damit die Freude an der Natur und das Verständnis ihrer Erscheinungen in den weitesten Kreisen unseres Volkes verbreiten. — Dieses Ziel glaubt die Gesellschaft durch Verbreitung guter naturwissenschaftlicher Literatur zu erreichen mittels des

Kosmos, Handweiser für Naturfreunde

Jährlich 12 Hefte. Preis M 2.80;

ferner durch Herausgabe neuer, von ersten Autoren verfaßter, im guten Sinne gemeinverständlicher Werke naturwissenschaftlichen Inhalts. Es erscheinen im Vereinsjahr 1913 (Änderungen vorbehalten):

Dr. K. Floericke, Einheimische Fische.
Reich illustriert. Geheftet M 1.– = K 1.20 h ö. W.

Dr. H. Dekker, Vom sieghaften Zellenstaat.
Reich illustriert. Geheftet M 1.– = K 1.20 h ö. W.

Dr. Ad. Koelsch, Der blühende See.
Reich illustriert. Geheftet M 1.— = K 1.20 h ö. W.

W. Boelsche, Festländer und Meere.
Reich illustriert. Geheftet M 1.– = K 1.20 h ö. W.

Dr. A. Zart, Bausteine des Weltalls.
Reich illustriert. Geheftet M 1.– = K 1.20 h ö. W.

Diese Veröffentlichungen sind durch alle Buchhandlungen zu beziehen; daselbst werden Beitrittserklärungen (Jahresbeitrag nur M 4.80) zum **Kosmos, Gesellschaft der Naturfreunde** (auch nachträglich noch für die Jahre 1904/12 unter den gleichen günstigen Bedingungen), entgegengenommen. (Satzung, Bestellkarte, Verzeichnis der erschienenen Werke usw. siehe am Schlusse dieses Werkes.)

Geschäftsstelle des Kosmos: Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart.

Bausteine des Weltalls

Atome und Moleküle

Von

Dr. A. Zart

Mit zahlreichen Abbildungen nach
Originalaufnahmen u. Zeichnungen
von C. Schmauck, R. Oeffinger u. a.
und einem Titelbild von W. Planck

Stuttgart
Kosmos, Gesellschaft der Naturfreunde
Geschäftsstelle: Franckh'sche Verlagshandlung

Alle Rechte, besonders das Übersetzungsrecht, vorbehalten

Copyright 1913 by
Franckh'sche Verlagshandlung
Stuttgart

Stuttgarter Setzmaschinen-Druckerei Holzinger & Co.

„Nichts existiert als die Atome und der leere Raum, alles andere ist Meinung."
Demokrit.

I.

Wie kann man nur an einen derartigen Unsinn wie diese Atome glauben! dachte ich ehemals, als der Chemielehrer uns klar zu machen versuchte, daß alle Stoffe wahrscheinlich letzten Endes aus unendlich kleinen, unsichtbaren Körperchen, eben den Atomen zusammengesetzt sind. Dann wären Luft und Steine, Wasser und Eisen, Zucker, Eiweiß und auch alle Stoffe meines Körpers ja nichts anderes als ein Gewimmel dieser Teilchen, die sich im durchaus leeren Raum tummeln, zusammenstoßen und sofort wieder auseinanderprallen oder einander in zitternder Bewegung festhalten. Man denke sich: in einem Kopfe voller Gedanken weiter nichts als ein Gewimmel ungezählter Scharen derartiger unendlich kleiner Kugeln! Unfaßbar und unwahrscheinlich!

Und was wurde diesen Atomen nicht alles angedichtet! Undurchdringlich und unteilbar sollten sie sein, eben die letzten, nicht weiter zerlegbaren Teile alles Stofflichen. Kann man sich das vorstellen? Und dabei doch vollkommen elastisch. Darüber zerbrach ich mir vergeblich den Kopf, wie feste, unteilbare Körperchen absolut elastisch sein können, denn zur Elastizität gehört doch die Fähigkeit der Formveränderung, verbunden mit Verdichtung und Verdünnung des Stoffes. Wie kann ich etwas bewegen, wenn ich mich ganz steif halte und keine Faser rühre?

Und weiter! Wie können sich diese Atome durch den leeren Raum hindurch anziehen und festhalten, was doch der Fall sein muß. Man braucht dabei gar nicht einmal an zähen Eisendraht zu denken. Schon die Tatsache, daß an meinem Finger, den ich in Wasser tauche, beim Herausziehen eine dünne Wasserhaut kleben bleibt, schien mir für die Atomtheorie ein unüberwindliches Problem zu sein. Daß die Atome einander vermöge der Anziehungskraft anziehen, ist, wie

268102

man zugeben wird, keine befriedigende Erklärung. Wenn ich aber derartige Annahmen, wie die des Daseins von Atomen, als richtig anerkennen soll, dann verlange ich auch, daß sie nicht mit solchen Mängeln behaftet sind, — dachte ich und kehrte der Atomtheorie den Rücken.

Von ihr ging ich zu den Philosophen. Die gaben auch an, die Welt erklären zu können. Sie hatten dazu noch den Vorteil für sich, nicht eine so umfangreiche technische Vorbereitung zu verlangen wie die Chemiker und Physiker. Hier wurde ich durch die allgemeine Ablehnung, die die Atome im Heerlager der modernen Philosophie und von einigen philosophierenden Naturforschern erfuhren, in meinen Ansichten noch bestärkt. Ich will nur zwei Männer von Weltruf anführen: Kant und Schopenhauer. Kant meinte: „Alles, was uns des Bedürfnisses überhebt, zu leeren Räumen unsere Zuflucht zu nehmen, ist wirklicher Gewinn für die Naturwissenschaft." Und Schopenhauer gar äußerte sich außerordentlich scharf und absprechend über „die ganze Leukippo-Demokrito-Kartesianische mechanisch-atomistische Physik mit ihren hölzernen Erklärungen". Man lese nur seine Abhandlung „Zur Philosophie und Wissenschaft der Natur", in der er die Anhänger der Atomlehre mit beißendem Witz zu vernichten glaubt und die größten Chemiker seiner Zeit als „unwissende Apotheker" abtut. Heute ist die Lage so geklärt, daß wir seinen Erguß mit behaglichem Schmunzeln lesen können, mit dem Vergnügen der berechtigten Schadenfreude, denn die Waffe des Spottes, die Schopenhauer schwang, — und er führte eine gar schneidige Klinge — kehrt sich jetzt gegen ihn selbst.

Abb. 1. Demokritos.
(Nach Peter Paul Rubens.)

Unbekümmert um den Hohn der Philosophie ging die Naturwissenschaft ihren Entwicklungsgang. Sie hat dabei allmählich ein

erdrückendes Material gesammelt, das heute auch die Ungläubigsten davon überzeugen muß, daß die Welt doch aus Atomen aufgebaut ist. Wie ihr das gelungen ist, ist äußerst interessant.

Dieser Ausgang der uralten Streitfrage aber hat mich zur Ehrfurcht gezwungen vor der Kühnheit der Phantasie und vor dem Gedankenfluge jener alten griechischen Philosophen, die in einer Zeit, in der die Naturwissenschaft ihre ersten, schüchternen Schritte machte, die Welt gedanklich in ein Gewimmel von Atomen auflösten und sie dann wieder daraus aufzubauen suchten, um sich die rätselvolle Natur dadurch verständlicher zu machen.

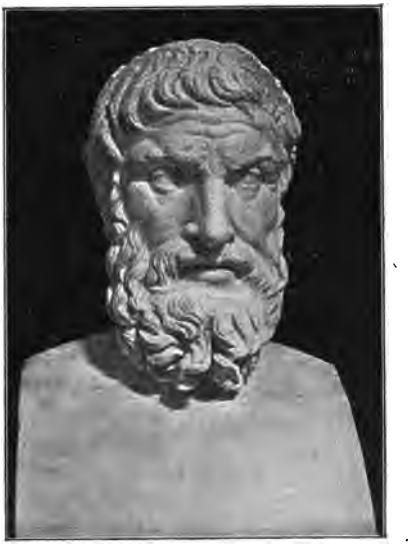


Abb. 2. Herme des Epikur. Rom, Vatikan. (Nach Hekler, Bildniskunst der Römer und Griechen.)

Schon im frühesten Morgengrauen der griechischen Philosophie treffen wir auf die atomistische Weltauffassung. Leukipp und sein Schüler Demokrit, der letztere um 460 v. Chr. in Abdera geboren, werden als ihre Väter genannt (Abb. 1). Wahrscheinlicher ist es allerdings, daß auch sie aus noch älteren Quellen schöpften. Epikur, der von 342—270 v. Chr. lebte, und dessen Bild uns in einer schönen Herme erhalten ist (siehe Abb. 2), fußte auf der Atomistik und baute auf ihr eine großzügige Weltanschauung und Lebensphilosophie auf. Ein lebendiges Bild seiner Lehre hat uns dann später der Römer Lukrez in einem genialen Lehrgedicht: „Von der Natur der Dinge" überliefert.*) Seine Darstellung ist unübertrefflich in ihrem Reichtum an anschaulichen Vergleichen, im Schwung und in der Schönheit ihrer Sprache und in der dichterischen Behandlung des so spröden Stoffes. Man wird sie immer wieder mit dem größten Genusse lesen, heute allerdings nicht mehr zur naturwissenschaftlichen Belehrung.

*) Lukrez lebte von 98—55 vor Chr.

Von der höheren Warte unseres unvergleichlich viel reicheren Wissens aus schauen wir lächelnd auf die reichlich gesäten, kindlichen Irrtümer und staunen dabei über die Kühnheit jener frühen Weisheit ebensosehr, wie über den Leichtsinn, mit dem man spielend die größten Schwierigkeiten scheinbar überwand, Schwierigkeiten, deren wir heute noch nicht Herr geworden sind.

Was uns diese alten Philosophen besonders interessant machen muß, ist folgendes: Während die moderne Atomlehre der Niederschlag einer unendlich reichen, kritisch gesichteten, experimentell gewonnenen Erfahrung ist, haben die Alten sich auf weiter nichts stützen können, als auf die ganz alltägliche Erfahrung des Lebens. Es ist bewundernswert, was sie aus ihr herausgedeutet haben.

Sie sahen unter dem wärmenden Kuß der Sonnenstrahlen die Pflanzen aus dem Boden wachsen, sie sahen Tiere von den Pflanzen leben, den Menschen in diese Kette mit einbegriffen, und sahen alles wieder vergehen, zu Schutt und Moder zusammensinken, Dünger werden für neu aufblühendes Leben. Sie schlossen notwendigerweise, daß diesem Wechsel der Gestalt etwas Einfacheres zugrunde liegen müsse, das sich in diese mannigfachen Formen zu kleiden und unverändert durch sie hindurchzugehen vermag. „Denn aus ähnlichem Stoff sind Erde und Himmel gebildet, und die Sonn' und das Meer, aus ähnlichem Pflanzen und Tiere; nur der verschiedene Grad verschiedener Mischung bestimmt sie."

Daß dies nach bestimmten Gesetzen vor sich geht, dafür sprach die Ordnung der täglichen Erfahrung. Wie käme es sonst, daß die Kinder immer den Eltern gleichen, daß aus den verschiedenen Stoffen der Nahrung immer dieselben Formen des Körpers aufgebaut werden!

Nun waren die stofflichen Verwandlungen zwar etwas unendlich Dunkles, aber das machte nichts; man gab sich nicht damit ab, das Rosten des Eisens etwa, das Verbrennen des Holzes, die Verwitterung des Felsens, das Wachstum der Pflanze auf die stofflichen Vorgänge hin näher zu untersuchen; das ging so rasch nicht, und ein Philosoph will schnell zum Ziele kommen.

Man sah das Wasser zu Eis erstarren oder zu unsichtbarem Dampf sich verflüchtigen. Man kannte die Gewinnung des Eisens und des Glases und erlebte die Verwandlung der Nahrung zu Körpersubstanz. Der Verwandlungsfähigkeit schien keine Grenze gesetzt,

und es schien ein ganz natürlicher Vorgang, daß „lebendige Würmer aus stinkendem Miste kriechen, wenn häufiger Regen den Boden in Fäulnis gesetzt hat", daß sie sich direkt aus diesem bilden können.

Wenn so, unter Einhaltung bestimmter Regeln, alles sich in alles verwandeln konnte, so war doch eines beständig und unvergänglich, mußte unvergänglich sein: die „Grundstoffe". Ihre Summe ist weder zu vermehren noch zu vermindern. Überall, wo etwas vergeht, entsteht dafür ein anderes: „So wie die Läufer der Bahn, nimmt einer die Fackel vom andern."

Wie ist nun, fragte man sich, die Vielgestaltigkeit der Dinge möglich, wenn die stoffliche Grundlage weit einfacher ist?

Hier bot sich in der Schrift ein ähnliches Problem und zugleich seine Lösung. Welch ein Reichtum an Gefühlen, Erlebnissen, Gedanken läßt sich durch die Schrift in Erzählungen, Sätzen und Wörtern ausdrücken, alles aber nur durch die wechselnde Aneinanderreihung weniger, verschieden geformter Buchstaben. Sollte es mit dem Reichtum der Natur nicht ähnlich sein?

Ein kühner, aber packender Gedanke!

Wie wäre es, wenn alle Stoffe letzten Endes aus für uns unsichtbaren, kleinsten Teilchen, aus Atomen zusammengesetzt wären? In ständiger Bewegung, bald dichter gedrängt, bald weit auseinander gestreut, könnten sie infolge ihrer verschiedenen Gestalt, Anordnung und Beweglichkeit die Ursache aller Verschiedenheit sein. Was spräche sonst noch für diese Vermutung?

Zunächst ein anderes Problem! Wie ist Bewegung möglich? Wäre Bewegung überhaupt denkbar ohne Annahme von leeren Räumen, in denen sich die Körper bewegen können? Wie könnte sich ein Fisch im Wasser bewegen, wenn das Wasser eine ohne Zwischenräume einheitlich zusammenhängende Masse wäre? Das vermögen wir uns offenbar nicht vorzustellen. Ganz anders dagegen, wenn man annimmt, daß das Wasser aus vielen kleinen, durch leere Räume getrennten Teilchen besteht, die sich verschieben lassen. Bewegung ist deshalb nur möglich, wenn es einen leeren Raum gibt und Atome, die sich in ihm bewegen. Die Atome und der leere Raum sind daher eine durchaus notwendige Annahme.

Und weshalb sollte der Stoff nicht aus für uns unsichtbaren, kleinsten Teilchen bestehen können? Wir können alle Stoffe zerkleinern, ohne daß sich eine Grenze für diese Teilbarkeit angeben

ließe. Fallende Wassertropfen höhlen schließlich einen Stein aus, ohne daß wir die Teilchen sehen, die jeder Tropfen fortschlemmt. In gleicher Weise nützt sich die Pflugschar im Acker ab und der Goldreif am Finger. Wie klein mögen die Teilchen sein, die uns den Duft der Rose zuführen? Die Regenwolke sieht durchaus einheitlich aus und besteht doch aus Regentropfen; also können wir auf den bloßen Augenschein nichts geben. Wir sehen auch die Wasserteilchen nicht, die langsam aus nasser, zum Trocknen aufgehängter Wäsche verdunsten. Fährt ein kalter Windhauch durch die feuchte Luft, so ballen sich diese Teilchen zu sichtbaren Wassertropfen zusammen. Tauchen wir ein Stück Zucker in Wasser, so sehen wir, wie das Wasser in den Poren des Zuckers in die Höhe steigt; seine Kristalle fallen auseinander, zerteilen sich immer mehr und sind schließlich für unser Auge ganz verschwunden. Was ist natürlicher, als anzunehmen, daß auch die letzten, sichtbaren Teilchen sich noch weiter zerteilt haben bis zu letzten, unteilbaren Atomen, die sich in den Poren des Wassers verlieren wie die Schafe einer Herde zwischen den Bäumen eines Waldes.

Übrigens, meint Lukrez, sehen wir ja auch die Luft nicht, und doch ist sie körperlicher Natur; davon überzeugt uns der Sturm in handgreiflichster Weise. Wir sehen auch die Staubpünktchen nicht, die in ihr umherwimmeln, und die ein Sonnenstrahl im dunklen Schatten aufleuchten läßt.

Andere Philosophen haben eingewendet: Wenn die Luft aus kleinen, weitverstreuten Atomen bestände, so müßten doch alle schon längst, der Schwere folgend, sich mit der Erde zu einer dichten Masse vereint haben. Dagegen führten die Atomisten wieder an, daß zwar die kleinen Steine, die der Fuß des galoppierenden Pferdes aufwirft, rasch wieder zur Erde gelangen, aber nicht die Teilchen des aufgewirbelten Staubes; sie halten sich lange schwebend. Denkt man sich diese Teilchen noch weiter verkleinert, so kommt man schließlich zur Beständigkeit der Atmosphäre, vor allem, wenn man annimmt, daß die Atome in ewiger Bewegung begriffen sind. Diese Bewegung ist natürlich nicht zu sehen; aber die Ausbreitung der Riechstoffe, die Wanderung der Wärme in einem Eisenstab, den ich mit einem Ende ins Feuer halte, sprechen für sie; ebenso die Erwärmung meiner Hände, wenn ich sie lebhaft reibe, wobei sich die grobe Bewegung der Hände in die unsichtbare ihrer Atome umwandelt. Ja, diese Be-

wegung wird uns sogar, wenn auch indirekt, durch die Stäubchen sichtbar gemacht, die der Sonnenstrahl auch in scheinbar reiner Luft aufleuchten läßt, meint Lukrez: „Auch sie sammeln und trennen sich wieder, ohne Ruhe und Rast: wodurch dir ein deutliches Bild wird, wie sich im Leeren jagen die uranfänglichen Stoffe ... Auch verdienen sie noch um so mehr Betrachtung, die Körper, die in der Sonne Strahl in solcher Verwirrung sich treiben, weil ihr treibendes Irren

Abb. 3. Sonnenstäubchen im Sonnenstrahl.
(Nach einer Originalzeichnung von R. Oeffinger.)

auf innere, verborgene Bewegung aller Materie zielt. Denn oftmals wirst du sie sehen, wie, vom geheimen Stoß erregt, sie die Richtung ändern, bald vorwärts, bald dahin und dorthin, nach jeglicher Seite getrieben durch ihn ...."

Nun gilt es, weitere Eigenschaften der Atome zu erraten. Wie der Jagdhund, der einmal auf die Spur des Wildes gebracht ist, Busch und Wald nach ihm durchstöbert, so muß man, sagt Lukrez, die Dinge bis in die geheimsten Winkel durchforschen, um hinter die Wahrheit zu kommen. Also die Atome sind beweglich. Sie müssen aber auch unvergänglich, also ewig sein, da sie ja die gesuchten Grundstoffe sind,

aus denen sich alles Vergängliche aufbaut. Aus demselben Grunde sind sie einfach und unteilbar; es wird ihrer auch verschiedene Arten geben, von mannigfacher Gestalt, um die bunte Vielheit der ewig veränderlichen Natur verständlich zu machen. Weich und locker können sie nicht gut sein, sondern sie werden fest und hart sein; denn wohl läßt sich die Weichheit der Körper durch lockere Lagerung harter Atome, aber nicht die Festigkeit des Steins und Eisens aus einem Gefüge lockrer Atome erklären. Die vergänglichen Eigenschaften der sichtbaren Körper wie Farbe, Wärme, Geruch, Geschmack usw. haften nur an bestimmten Vereinigungen der Atome und verschwinden mit ihnen.

In dieser Art kann man noch lange weiter „philosophieren", und das haben die alten Atomisten mit großem Scharfblick und Spürsinn, aber auch mit viel Naivität reichlich getan. So müßten, meinten sie z. B., scharf schmeckende, salzige, saure, bittere Substanzen Atome haben, die eckig, spitz, stechend sind. Die Seele ferner müßte der Beweglichkeit der Gedanken wegen aus Atomen von besonders glatter, runder Form und großer Beweglichkeit bestehen, deren Gewicht nur sehr gering sein könnte, da mit dem Tode, in dem die Seele entweicht, keine Gewichtsveränderung eintritt.

So gerieten sie langsam auf Gebiete, auf denen die Leistungsfähigkeit ihrer Philosophie notwendigerweise aufhören mußte und auch die geistreichste und genialste Auslegung zufälliger Erfahrungen des täglichen Lebens nicht weiter kommen kann. Dies ist wohl mit ein Grund, weshalb die Philosophie sich später ganz allgemein von den Atomen abkehrte und nach wiederholten, vergeblichen Versuchen, die in ihrer Annahme liegenden theoretischen Schwierigkeiten zu überwinden, andere Wege versuchte.

Anders die Naturwissenschaft. Ehe sie sich aber des Problems annahm, waren viele Jahrhunderte seit der griechischen Atomistik verflossen. Inzwischen hatte die Religionsphilosophie das philosophische Denken in ganz falsche Bahnen geleitet. Daß sie mit der Atomistik nicht gut Freund sein konnte, war erklärlich. Denn was hätte in der Welt der ewigen, unvergänglichen Atome, die sich nach ewigen, unveränderlichen Gesetzen ordnen, ein Gott zu tun! Die scheinbare Weisheit und Zweckmäßigkeit der Natur erklärten die Atomistiker ganz natürlich dadurch, daß alles Unzweckmäßige sich nicht erhalten kann und untergehen muß. Die Religionsphilosophie

dagegen sah in dieser Zweckmäßigkeit den Willen eines höheren Wesens. Infolgedessen war die Atomistik viele Jahrhunderte hindurch aus dem Denken der Menschheit so gut wie ausgelöscht. Wieviel Engel etwa auf einer Stecknadelspitze Platz haben, ohne zu sehr ins Gedränge zu kommen, das war für diese Zeiten ein viel interessanteres Problem, über das gelehrte Untersuchungen angestellt wurden. Im geheimen aber glomm der Funke der Erkenntnis weiter. Man muß es als eine Ironie des Schicksals ansehen, daß ein katholischer Priester, Gassendi, der von 1592 bis 1655 in Frankreich lebte, sich dazu berufen fühlte, die Philosophie des Epikur wieder auszugraben und sie als begeisterter Anhänger zu preisen. Um dies ungestraft tun zu können, mußte er allerdings einen Kniff anwenden, der in jenen Zeiten in mannigfacher Variation üblich war. Er sagte, es sei ja gewiß, daß Gott die Welt erschaffen habe, es sei aber doch interessant, einmal darüber nachzudenken, wie sie ohne Gottes Eingriff wohl von selbst geworden sein würde. Damit war die Atomlehre wieder in das Bewußtsein der Menschheit zurückgerufen, und von da ab ist sie nicht wieder untergegangen.

„Ich wurde von einigen gelehrten Männern aufgefordert, die Atomtheorie durch chemische Experimente zu veranschaulichen." Robert Boyle.

II.

Im Jahre 1595 schrieb ein gewisser Jakob Horst, Professor in Helmstädt, ein gelehrtes Buch darüber, wie man sich die Tatsache erklären könnte, daß einem Knaben in Schweidnitz ein goldener Zahn gewachsen sei. Es hätten sich hier eben unter ganz besonderen Einflüssen die Stoffe anders geordnet wie sonst, so daß sich jetzt einmal statt des gewohnten ein goldener Zahn gebildet habe.

Damals kannte man die Grenzen der stofflichen Verwandlungsfähigkeit noch nicht, so daß selbst ein so genialer Kopf wie der berühmte holländische Arzt van Helmont, der 1644 starb, der Überzeugung war, es könnten sich „in einem Gefäß, das Weizenmehl und ein schmutziges Hemd enthält, durch direkte Umwandlung Mäuse bilden." Ja, es erschien vielleicht manchem Grübler jener Zeiten nicht unwahrscheinlich, daß es eines Tages gelingen könnte, künstlich Menschen zu machen, den Homunculus des Faust erstehen zu lassen, etwa wie man heute künstlichen Honig macht.

Es erscheint deshalb ganz verständlich, daß man es auch für möglich hielt, Metalle ineinander zu verwandeln. So mühten sich im ganzen Mittelalter die Alchimisten ab, aus unedlen Metallen Gold zu machen, ein Ziel, das zweifellos zu Versuchen reizen konnte. Gold hat man dabei nicht gefunden, wohl aber etwas anderes, was überaus wertvoll werden sollte. Diese alchimistischen Versuche und die später einsetzenden Arbeiten, auf chemischem Wege Stoffe zu bereiten, die von allen Krankheiten heilen und ein langes Leben bescheren könnten, förderten eine Unmenge wichtiger Kenntnisse über die Eigenschaften der Stoffe, ihre Umwandlungen und die Grenzen ihrer Verwandlungsfähigkeit zutage. Es war das Morgendämmern der chemischen Wissenschaft, das hier anbrach. Neben

der Bereicherung des Wissens wurde im Laufe der Jahrhunderte vor allem auch die experimentelle Geschicklichkeit außerordentlich gefördert.

Will man über die atomistische Weltansicht der Alten, die sich nur auf alltägliche Naturerfahrung stützt, und die man an einem schönen Tage, im Grase liegend, zusammenphilosophieren kann, hinauskommen, so muß man es sich schon ein wenig Mühe kosten

Abb. 4. Alchimistisches Laboratorium.
(Aus dem Deutschen Museum in München.)

lassen; man muß mit der Natur mehr handgemein geworden sein, muß sie zwingen können, auf wichtige Fragen selbst Antwort zu geben, das heißt, man muß experimentieren können.

Hierzu war die Zeit reif geworden, als Gassendi die atomistische Weltanschauung nach jahrhundertelangem Schlafe wieder auferweckte. Die Astronomie hatte seit Kopernikus, Galilei und Kepler ungeheure Fortschritte gemacht; Galilei hatte die Gesetze des Falles, des Wurfes und der Pendelbewegung untersucht; das Fernrohr war erfunden worden, Magnetismus und Elektrizität wurden durch vielversprechende Versuche näher erforscht,

Guericke machte seine berühmten Luftpumpenexperimente, kurz, die experimentelle Naturwissenschaft war auf dem Marsche; sie hielt auch in der Chemie ihren Einzug, als die Philosophie sich mit der Experimentierkunst der Alchimisten und Medizinfabrikanten vermählte, die unbekümmert um das Dasein oder Nichtdasein der Atome rein praktischen Zielen nachgestrebt hatten. Nun konnte das philosophische Atomproblem von der praktischen Seite angepackt werden.

Abb. 5. Robert Boyle.
(Nach einem zeitgenössischen Stiche.)

Dies geschah in ganz bewußter Weise durch Robert Boyle, einen englischen Forscher, der von 1627 bis 1691 lebte. „Ich wurde," so erzählte er, „von einigen Gelehrten aufgefordert, die Atomtheorie durch chemische Experimente zu veranschaulichen, oder zu versuchen, ob sich die Atomlehre des Gassendi oder des Kartesius durch die chemischen Tatsachen besser erklären lasse, als durch die Methoden der Peripatetiker*) und Feuerphilosophen".

Was sind chemische Tatsachen und chemische Vorgänge? Wenn ich Kohle unter dem Herd verbrenne, so verschwindet sie unter Feuererscheinung und Auftreten von Wärme. Halte ich ein brennendes Streichholz darüber, so erlischt es, ein Zeichen für das Entweichen eines Gases, das die Verbrennung nicht unterhalten kann. Es ist die Kohlensäure. Fange ich sie ab und leite sie in klares, durch Lösen von gebranntem Kalk in Wasser hergestelltes und filtriertes Kalkwasser, so trübt es sich sofort unter Ausscheidung von kohlensaurem Kalk.

Zünde ich Schwefel an, so brennt er mit bläulicher Flamme, und

*) Mit den „Methoden der Peripatetiker" ist die Philosophie des Aristoteles gemeint, über die das Mittelalter nicht hinausgekommen war. Die Feuerphilosophen nahmen an, daß das Feuer der lebendige Urstoff aller Dinge sei.

ein charakteristischer, stechender Geruch tritt auf, der von einem neugebildeten Gas, der schwefligen Säure herrührt; auch in ihr erlischt ein brennendes Streichholz.

Das sind chemische Umsetzungen. Wenn ich aber Wasser erhitze, so verschwindet es zunächst auch. Bei der Abkühlung erscheint es jedoch wieder. Hier hat keine dauernde stoffliche Veränderung stattgefunden, die Verdampfung ist daher kein chemischer Vorgang, sondern eine einfache physikalische Zustandsänderung. Chemische Vorgänge sind im Gegensatz hierzu solche, bei denen die beteiligten Stoffe verschwinden und an ihrer Stelle neue Stoffe mit anderen charakteristischen Eigenschaften auftreten.

Löse ich Kochsalz in Wasser, so kann ich in der Lösung sowohl Wasser als Kochsalz erkennen, und wenn ich das Wasser verdunsten lasse, so bleibt das Kochsalz zurück. Wenn ich aber Zink in verdünnter Schwefelsäure löse, so sehe ich zunächst Gasblasen auftreten, die sich bei näherer Untersuchung als brennbar erweisen; es ist Wasserstoff. Lasse ich das Wasser der entstandenen Lösung verdunsten, so bleibt nicht etwa wieder Zink zurück, sondern ein Salz: Zinksulfat oder schwefelsaures Zink. Die erste Lösung ist durch einen physikalischen, die zweite durch einen chemischen Vorgang entstanden.

Reiben wir feine Eisenfeilspäne, sagen wir 20 g, mit 10 g Schwefel zusammen, so erhalten wir ein grünlich-graues Pulver, das ganz einheitlich aussieht. Bringen wir eine Probe davon in ein Probierglas, gießen Wasser darauf und schütteln tüchtig durch, so bleibt unten das schwere Eisenpulver liegen, während der Schwefel das Wasser trübt. Halten wir über eine andere Probe einen Magneten, so zieht er den Eisenstaub an sich, und der Schwefel bleibt zurück. Gießen wir auf eine dritte Probe verdünnte Salzsäure, so löst sich nur das Eisen, während ein geruchloses Gas (Wasserstoff) entweicht und der Schwefel zurückbleibt. Das sind alles Beweise, daß das graue, aus Eisen und Schwefel zusammengeriebene Pulver eine physikalische Mischung ist. Nun nehmen wir den Rest dieser Mischung, bringen ihn in ein Probierrohr und erhitzen den untersten Teil. Zuerst schmilzt der Schwefel; dann fängt auf einmal der erhitzte Teil an rot zu glühen, und diese Glüherscheinung schreitet rasch durch die ganze Masse fort, die zusammenbackt. Wir zerkleinern sie nach dem Erkalten und erhalten ein grauschwarzes Pulver. Der Magnet zieht aus ihm kein Eisen mehr heraus, Wasser vermag keine Trennung

mehr herbeizuführen, und schütte ich Salzsäure darauf, so entweicht ein unangenehm riechendes, giftiges Gas (Schwefelwasserstoff), während das ganze Pulver in Lösung geht. Nach dem Erhitzen sind also alle Eigenschaften vollständig verändert. Hier handelt es sich daher um einen chemischen Vorgang, bei dem ein neuer Stoff, Schwefeleisen, entstanden ist.

Froh unserer neuen Kunst wollen wir nun einmal zusehen, wie die chemischen Tatsachen zur Prüfung der Atomhypothese zu verwerten sind. Zunächst könnten wir sofort untersuchen, ob die Voraussetzung des Demokrit, daß die Grundstoffe unzerstörbar und unvergänglich sind, wirklich zutrifft. Ist das wahr, so muß das Gesamtgewicht aller Stoffe bei der chemischen Umsetzung erhalten bleiben. Um das festzustellen, bringen wir z. B. unsere Schwefeleisen-Mischung in ein geschlossenes Gefäß, damit nichts entweichen kann, und wiegen es. Dann erzeugen wir durch Erhitzen Schwefeleisen, lassen abkühlen und wiegen wieder. Oder wir bringen Schwefel in ein Glasgefäß, das wir verschließen und wiegen. Darauf zünden wir den Schwefel, durch ein Brennglas etwa, an, warten, wenn die Verbrennung zu Ende ist, bis die Temperatur den alten Stand erreicht hat, und wiegen wieder.

Derartige Versuche sind seit Lavoisier, der sie zu diesem Zweck zuerst ausführte, und dessen Bild wir in Abb. 6 bringen, bis in die neueste Zeit mit steigender und größter Genauigkeit angestellt worden. Ihr Ausfall berechtigt uns zu dem Schlusse, daß bei chemischen Umsetzungen keine Zu- oder Abnahme des Gesamtgewichtes der beteiligten Stoffe eintritt. Die Gesamtmenge ist also unveränderlich, und nur die Art der Zusammensetzung wechselt.

Dieser Satz unterscheidet sich trotz mancher Ähnlichkeit doch ganz wesentlich von der philosophischen Denkforderung des Demokrit: „Aus nichts wird nichts", und zwar dadurch, daß er sich auf ganz bestimmte, experimentell erwiesene Tatsachen stützt. Dieser Unterschied besteht auch zwischen der naturwissenschaftlichen Atomhypothese, die sich nun allmählich ausbildete, und der alten, philosophischen Atomlehre. Der wertvollste Besitz der Naturwissenschaft ist der Schatz ihrer experimentellen Erfahrungen, und die allgemeinen Schlüsse, die Theorien, scheinen zunächst weiter nichts als deren praktische, übersichtliche Zu-

sammenfassung zu sein. Der hier aufgedeckte Unterschied tritt uns gleich bei dem nächsten Schritt besonders deutlich entgegen.

Die alten Atomisten hatten ganz allgemein von Grundstoffen geredet, hatten sich aber nicht die Mühe gemacht, sie nun auch praktisch aufzusuchen. Andere Philosophen hatten das Wasser, die Luft, das Feuer, die Erde, die Alchimisten dann Schwefel, Quecksilber, Salz als solche Grundstoffe angesprochen, hatten aber dabei nur der verschwommenen, symbolischen Auffassung Ausdruck geben wollen, daß alle Stoffe aus flüssigen, gasförmigen, festen, metallähnlichen, brennbaren oder unverbrennlichen Anteilen zusammengesetzt seien. Wissenschaftlichen Anforderungen konnten diese „Elemente" nicht genügen, und so machte Boyle einen anderen, einfachen Vorschlag, man möge alle jene Stoffe als Grundstoffe betrachten, die sich nicht weiter in verschiedenartige Anteile zerlegen lassen, und sie Elemente nennen. Das ist in der Folge mit außerordentlichem Nutzen geschehen. Die erwähnte Zerlegung kann unter anderem durch den elektrischen Strom vorgenommen werden, durch den z. B. Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff geschieden wird, oder auch durch bloßes Erhitzen, wie beim Quecksilberoxyd z. B., das bei 400° in Quecksilber und Sauerstoff zerfällt. Bekannt ist die technische Darstellung von Eisen aus dessen Verbindungen mit Sauerstoff, den Eisenoxyden, die man zu diesem Zwecke mit Kohle, unter Einblasen von Luft erhitzt. Die Kohle verbrennt dabei zu Kohlenoxyd, und dieses befreit dann bei ungefähr 1000° das Eisen vom Sauerstoff. Das Element Chlor stellt man durch Zer-

Abb. 6. Antoine Laurent Lavoisier.
(Nach einer zeitgenössischen Zeichnung.)

legen von Salzsäure, der Verbindung des Chlors mit Wasserstoff dar, die man dazu mit Braunstein erhitzt.

So einfach und naheliegend auch der Vorschlag von Boyle war, so konnte er doch erst gemacht werden, als man chemisch zu experimentieren, Stoffe zu zerlegen, gelernt hatte. Jetzt war es nur noch eine Aufgabe praktischer Versuche, die Elemente aufzufinden. Zu den Elementen gehören bekanntlich alle Metalle, sodann Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Schwefel, Phosphor, Chlor usw. Man hat ihrer bisher 83 aufgefunden. Ehe diese Angabe aber gedruckt ist, können es schon wieder mehr sein, denn ihre Zahl vermehrt sich noch immer, wenn auch natürlich viel langsamer als früher. Boyles Begriffsbestimmung war außerordentlich glücklich gewählt; denn wenn es gelingt, einen bisher als Element angesehenen Stoff doch noch zu spalten, so war er eben kein Element, und wir haben nun erst seine Natur erkannt.

Umgekehrt entstehen durch Vereinigung der Elemente die zusammengesetzten Stoffe, wie das Wasser durch Verbrennen von Wasserstoff und Sauerstoff in der Knallgasflamme. Sie haben scheinbar nichts von den Eigenschaften der Elemente übernommen, und die Elemente sind in ihnen für unsere Sinne vollständig verschwunden. Trotzdem nehmen wir an, daß die Elemente in diesen Verbindungen fortbestehen, da wir sie aus ihnen wieder darstellen können, und zwar in derselben Menge, mit der sie hineingegangen sind.

Was ist es für eine überaus merkwürdige Vorstellung, daß der harte, schwarze Kohlenstoff in der Kohlensäure sowohl wie im Benzin, im Zucker wie im Eiweiß und im Brot enthalten ist; oder daß unser Kochsalz aus dem Metall Natrium, das Wasser außerordentlich heftig unter Wasserstoffentwicklung zersetzt, und dem gelbgrünen, erstickend riechenden, alle organischen Stoffe heftig angreifenden Element Chlor besteht. Auf dieses Problem fällt aber gleich Licht, wenn wir den Vorteil ausnutzen, den uns die Atomhypothese bietet.

Nehmen wir an, daß die Elemente aus durchaus gleichartigen Atomen zusammengesetzt sind, so müssen bei der Vereinigung verschiedener Elemente die verschiedenen Atome zu neuen, zusammengesetzten, kleinsten Teilchen zusammentreten. Wir müssen annehmen, daß die Eigenschaften eines jeden Stoffes durch dessen kleinste Teil-

chen bedingt werden. Diese Teilchen sind bei den Elementen andere als bei den zusammengesetzten Stoffen, den Verbindungen, also werden es auch die Eigenschaften sein.

Ist das der Fall, so entsteht die auch wieder experimentell zu entscheidende Frage, in welcher Anzahl sich die Atome vereinigen. Ist diese Anzahl dem Zufall überlassen oder gesetzmäßig bestimmt? Betrachten wir den einfachen Fall der Vereinigung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser. Treten hier beliebig viele Atome Wasserstoff mit beliebig vielen Atomen Sauerstoff zu einem Wasserteilchen zusammen? Würde das der Fall sein, und darüber können Versuche Auskunft geben, so müßte man das Wasser durch Destillation oder auf andere Weise in verschiedene Bestandteile zerlegen können (etwa wie man feines und grobes Mehl voneinander sondert), in denen auf dieselbe Menge Wasserstoff verschiedene Mengen Sauerstoff kommen. Stellen wir über diese Frage einige Versuche an.

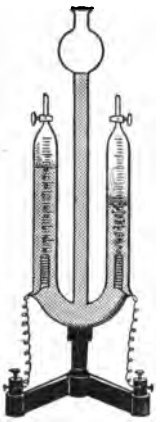


Abb. 7. Apparat zur elektrolytischen Zerlegung von Wasser. Drei senkrechte Röhren, von denen zwei oben durch Hähne verschließbar sind, während die dritte sich oben zu einem Trichter erweitert, stehen an den unteren Enden miteinander in Verbindung.

Drei senkrechte Röhren, von denen zwei oben durch Hähne verschließbar sind, während die dritte sich oben zu einem Trichter erweitert, stehen an den unteren Enden miteinander in Verbindung (Abb. 7). Durch den Trichter gießen wir so lange Wasser ein, bis es aus den beiden anderen Röhren herausfließt, dann schließen wir die beiden Hähne. In die beiden oben geschlossenen Röhren führen unten die Enden eines elektrischen Stromkreises zu kleinen Platinblechen. Schließt man den Strom, so setzt an den Platinblechen eine Gasentwicklung ein; Gasblasen steigen in die Höhe und sammeln sich oben an, wobei sie das Wasser in die dritte Röhre hineindrücken. Hierbei fällt bald auf, daß die Gasmengen in den beiden Röhren verschieden groß sind. Die genauere Betrachtung zeigt, daß die Gasmenge in der einen Röhre immer doppelt so groß ist wie die der andern. Unterbrechen wir den Strom, wenn sich in der einen Röhre mit der schwächeren Gasentwicklung 10 ccm Gas angesammelt haben, so finden wir in der anderen 20 ccm. Bei näherer Untersuchung stellt sich heraus, daß die 20 ccm Wasserstoff und die 10 ccm

Sauerstoff sind. Dieses Raumverhältnis der beiden entstehenden Gase 2:1 finden wir bei der Zerlegung des Wassers stets wieder.

Umgekehrt können wir Wasserstoff und Sauerstoff miteinander vereinigen. Mischen wir 20 ccm Wasserstoff mit 10 ccm Sauerstoff und lassen einen elektrischen Funken hindurchschlagen, so verbrennen sie vollständig miteinander zu Wasser. Nehmen wir zu dem Versuch 20 ccm Wasserstoff und 20 ccm Sauerstoff, so bleiben 10 ccm Gas zurück, die sich als Sauerstoff erweisen, denn sie werden von einem Stück Phosphor vollständig verschluckt. Da die 10 ccm Sauerstoff ungefähr 8 mal so schwer sind wie die 20 ccm Wasserstoff, so würden sich 8 g Sauerstoff mit 1 g Wasserstoff zu 9 g Wasser vereinigen. Wir können das Wasser noch auf viele andere Arten herstellen, z. B. dadurch, daß wir Wasserstoff über erhitztes, schwarzes Kupferoxyd leiten und feststellen, welche Menge Sauerstoff dabei dem Kupferoxyd entzogen wird und wieviel Wasser entsteht; immer finden wir dasselbe Gewichtsverhältnis der verbrauchten Elemente und des entstehenden Wassers.

Dieselbe Erfahrung machen wir bei der Untersuchung jedes anderen chemisch einheitlichen Stoffes, gleichgültig, ob wir Kochsalz, Salzsäure, Glaubersalz, Zucker oder sonst eine Substanz untersuchen; immer werden wir finden, daß das Gewichtsverhältnis, in dem sich die Elemente zu einem bestimmten Stoff verbinden, fest und unveränderlich ist. In die Sprache unserer Atomhypothese übersetzt, würde das also heißen, daß alle Atome derselben Elemente gleich schwer sind, und daß die Atome der verschiedenen Elemente sich in ganz bestimmter Anzahl, in *festen Verhältnissen* miteinander verbinden. Das war nicht ohne weiteres vorauszusehen. Die Meinungen darüber waren ehemals auch sehr geteilt, und es hat außerordentlich vieler Versuche bedurft, diese Tatsache sicher und einwandfrei festzustellen.

Die Lage war auch insofern etwas verwirrend, als es bekannt war, daß die Elemente sich nicht nur in einem, sondern in mehreren Gewichtsverhältnissen miteinander vereinigen. So besteht z. B. das giftige Kohlenoxyd aus 42,86% Kohlenstoff und 57,14% Sauerstoff, während die Kohlensäure 27,27% Kohlenstoff und 72,73% Sauerstoff enthält. In allen derartigen Fällen konnte festgestellt werden, daß diese Verhältnisse auch durchaus feste und beständige sind, also zwischen einer bestimmten, für jeden Stoff feststehenden An-

zahl von Atomen eingegangen werden. Diese Schlußfolgerung zog Dalton, ein englischer Chemiker, der von 1766—1844 lebte, und dessen Bild Abb. 8 zeigt; er hat sich mit ihr unsterbliche Verdienste um die Entwicklung der Chemie und der Atomtheorie erworben, denn sie brachte Licht in ein bis dahin dunkles Gebiet. Dalton fragte sich in solchen Fällen, wieviel Atome von dem einen Element in beiden Stoffen auf die gleiche Anzahl Atome, also auf die gleiche Gewichtsmenge des anderen Elementes kommen. Rechnet man den oben angegebenen Prozentgehalt so um, daß beide Male dasselbe Gewicht Kohlenstoff genommen wird, z. B. 12 g, so erhält man folgende Zahlen: 28 g Kohlenoxyd bestehen aus 12 g Kohlenstoff und 16 g Sauerstoff; 44 g Kohlensäure bestehen aus 12 g Kohlenstoff und 32 g Sauerstoff.

Abb. 8. John Dalton.
(Nach einer Zeichnung von W. Planck.)

Durch diese einfache Umrechnung, die Dalton anstellte, bekamen die Zahlen ein ganz anderes Gesicht. Die Sauerstoffmengen verhalten sich wie 1:2; würden wir also annehmen, im Kohlenoxyd wäre 1 Atom Kohlenstoff mit 1 Atom Sauerstoff verbunden, so müßte in der Kohlensäure 1 Atom Kohlenstoff mit 2 Atomen Sauerstoff vereinigt sein. Dalton schuf hierfür ein anschauliches Bezeichnungssystem (das jetzt aber verlassen ist), indem er jedes Atom durch einen kleinen Kreis bezeichnete, z. B.:

Ähnliche einfache Verhältnisse konnte Dalton auch in allen anderen Fällen feststellen. Ich greife noch ein beliebiges Beispiel heraus. Verbrennt man Schwefel zu schwefliger Säure, so verbrauchen 32 g

Schwefel 32 g Sauerstoff. Leitet man die entstandene schweflige Säure mit Luft gemischt bei höherer Temperatur über fein verteiltes Platin, so entsteht durch erneute Aufnahme von Sauerstoff ein neuer Stoff, der bei gewöhnlicher Temperatur fest ist und weiße kristallinische Fäden bildet, das sog. Schwefelsäureanhydrid oder Schwefeltrioxyd. Aus den anfänglich verbrannten 32 g Schwefel sind dabei 80 g Schwefeltrioxyd entstanden, so daß also im ganzen 48 g Sauerstoff gebunden wurden. Die Sauerstoffmengen stehen in beiden Verbindungen im Verhältnis 2:3. Dalton würde also angenommen haben, daß 1 Atom Schwefel in der schwefligen Säure mit zwei und im Schwefeltrioxyd mit drei Atomen Sauerstoff verbunden ist.

In dieser zunächst ganz willkürlichen Folgerung, die Dalton zog, steckte die berechtigte Voraussetzung, daß man das Gewichtsverhältnis der verschiedenen Atome zu bestimmen vermag, ohne das wirkliche Gewicht eines einzelnen Atoms zu kennen; denn es ist klar, daß das Gewichtsverhältnis zwischen einem Atom Wasserstoff und einem Atom Sauerstoff ebenso groß ist, wie das zwischen tausend oder zwischen vielen Milliarden von ihnen, die bei unseren gewöhnlichen Gewichtsbestimmungen vorhanden sind. Was berechtigte Dalton aber zu der Annahme, daß z. B. im Kohlenoxyd ein Atom Kohlenstoff sich mit nur einem Atom Sauerstoff verbindet? Könnten es nicht auch zwei Atome Sauerstoff sein, so daß in der Kohlensäure ihrer vier auf ein Atom Kohlenstoff kämen? Die Antwort darauf ist, daß Dalton die einfachsten Zahlen, die einfachsten Verhältnisse als die wahrscheinlichsten annahm. Manchmal hatte er dabei Glück und traf das Richtige. In anderen Fällen führte ihn seine Methode irre, so z. B., als er annahm, daß im Wasser ein Atom Wasserstoff mit einem Atom Sauerstoff vereinigt sei. Nein, so leicht sollte es uns nicht gemacht werden, wie es sich Dalton dachte; aber er hatte doch den Ariadnefaden gefunden, der uns dann später aus dem Irrgarten der sonst ganz unübersichtlichen Tatsachen herausleitete.

Man hat im Laufe der Zeit die aus mehreren Atomen zusammengesetzten kleinsten Teilchen eines Stoffes, wie z. B. des Wassers, Zuckers usw., „Moleküle" genannt, und von den Atomen, den kleinsten Teilchen der Elemente, unterschieden. Die Moleküle sind also noch in Atome zerlegbar, diese aber — vorläufig — nicht weiter zu spalten.

Nun fällt auch ein alter philosophischer Einwand gegen die

naturwissenschaftliche Atomhypothese ganz von selbst in sich zusammen. Wir glauben nicht an eure Atome als die letzten, unteilbaren Bausteine alles Stofflichen, hatten die Gegner der Atomisten immer gesagt, denn wir sehen keinen Grund für die Beschränkung der Teilbarkeit ein. Wir können uns jedes noch so kleine Teilchen doch immer wieder halbiert denken, die entstehenden Hälften wieder geteilt usf., ohne eine Grenze dieser Teilbarkeit zu sehen. Sie hatten dabei zunächst die in Gedanken unbegrenzte Teilbarkeit des Raumes mit der begrenzten Teilbarkeit stofflicher Gebilde verwechselt, über die nur der Versuch entscheiden kann. Dann aber kann man ihnen auch ruhig zugestehen, daß unsere heutigen Atome gar nicht die letzten unteilbaren Teilchen zu sein brauchen, daß sie ganz gut noch weiter spaltbar sein können; diese Teilbarkeit ist ja gar kein Beweis mehr gegen das Vorhandensein der Atome. Wir haben die aus verschiedenen Atomen zusammengesetzten Moleküle kennen gelernt. Sie sind wohl noch zu zerlegen, aber dabei zerfallen sie in Atome, und es entstehen ganz neue Stoffe mit ganz neuen Eigenschaften, z. B. aus dem Wasser die Gase Wasserstoff und Sauerstoff. Die letzten charakteristischen Teilchen des Wassers sind die Wassermoleküle, und die Atome sind die letzten charakteristischen Teilchen der Elemente. Würde man z. B. die Atome des Quecksilbers noch weiter zerteilen können, so würde dabei auch das Quecksilber mit seinen so bezeichnenden Eigenschaften verschwinden.

Wie stelle ich nun die Größe eines Moleküls fest, d. h., wie ermittle ich die Anzahl von Atomen, die sich in ihm vereinigen? Dazu müßte man ja auch das Gewichtsverhältnis der verschiedenen Atome zueinander kennen. Man hat sich geholfen, so gut es ging. Man hat zunächst als Grundmaß für die Atome das leichteste Atom genommen, das in allen Verbindungen immer mit dem kleinsten Gewichtsanteil vertreten war, das war das Wasserstoffatom; dann hat man aus den zahlreichen experimentellen Feststellungen aller untersuchten Stoffe herauszurechnen versucht, wieviel mal so schwer die anderen Atome sind als so ein Wasserstoffatom, das mit 1 in die Rechnung eingesetzt wurde. Die so erhaltenen Zahlen nannte man Atomgewichte. Man fand z. B., daß sich das Chlor nur in einem einzigen Gewichtsverhältnis mit Wasserstoff verbindet, und zwar im Verhältnis 35,5 : 1. Infolgedessen konnte man das Atomgewicht des Chlors gleich 35,5 setzen und nahm in dem Salzsäuremolekül 1 Atom

Wasserstoff und 1 Atom Chlor an. Weiter war außer unserem Kochsalz keine andere Verbindung von Chlor und Natrium bekannt; ihr Gewichtsverhältnis betrug 35,5:23; also konnte man annehmen, daß ein Molekül Kochsalz aus einem Atom Chlor und einem Atom Natrium besteht, und daß das Atomgewicht des Natriums wahrscheinlich 23 ist. So konnte man immer weiter rechnen. In dem Augenblick aber, in dem sich herausgestellt hätte, daß sich zwei Atome Chlor und nicht eines mit einem Atom Wasserstoff zu Salzsäure vereinigen, wäre die ganze Rechnung falsch gewesen. In diesem Fall ist das nicht geschehen; aber unsicher war die ganze Geschichte doch, und in manchen anderen Fällen hat man sich auch wirklich geirrt, trotzdem man noch alle möglichen anderen Beobachtungen benutzen konnte.

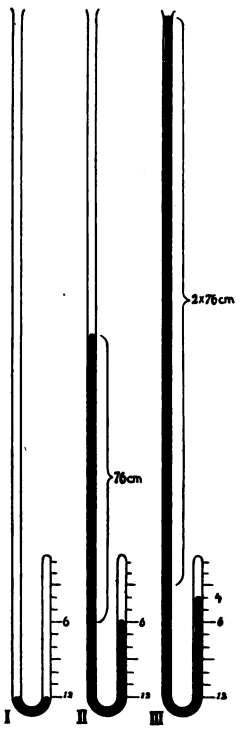


Abb. 9 zeigt die Beziehung zwischen Druck und Gasraum.

Die befriedigende Lösung dieses Problems war so schwierig, daß fünfzig Jahre vergingen, bis man sie gefunden hatte, trotzdem der richtige Weg gleich im Anfang von Avogadro, einem italienischen, und von Ampère, dem berühmten Physiker und französischen Zeitgenossen Daltons, gewiesen worden war. Auch Dalton hatte diesen Weg gekreuzt, vielleicht war er ihn sogar eine Strecke weit gegangen, dann aber hatte er ihn wieder verlassen. Dieser richtige Weg öffnete sich bei dem Studium der physikalischen Eigenschaften und chemischen Umwandlungen der Gase, die gerade damals im Mittelpunkt des Interesses standen.

Man kann sich ganz gut vorstellen, daß ein besonderer Anreiz darin lag, die Luft und die luftartigen Körper zum Gegenstand der Untersuchung zu wählen und damit experimentell in ein Gebiet einzudringen, das, so wichtig es für unser Leben auch ist, auf den ersten Blick so wenig zugänglich erscheint. Man mußte mit Gasen erst umgehen lernen, mußte lernen, sie zu messen, zu wägen, chemische

Umsetzungen mit ihnen vorzunehmen und diese messend zu verfolgen. Dabei hatte man ganz besonders interessante, nur den Gasen eigentümliche Regelmäßigkeiten gefunden. So hatte Boyle z. B. untersucht, wie groß die Raumverminderung ist, wenn man auf ein Gas, z. B. die Luft, einen Druck von bekannter Größe ausübt.

Das ist auf folgende Weise leicht zu bestimmen. Wir gießen in ein Glasrohr, wie es Abb. 9 I, zeigt, so viel Quecksilber, daß die Luft gerade abgesperrt ist. Sie steht jetzt unter dem Drucke der Atmosphäre, der sie das Gleichgewicht hält. Wie groß ist dieser Druck? Er entspricht, wie jedes Quecksilberbarometer (Abb. 10) zeigt, dem Gewicht einer Quecksilbersäule von durchschnittlich 76 cm Höhe; denn so ein Quecksilberbarometer ist ja weiter nichts als eine mit Quecksilber gefüllte und umgedrehte lange Glasröhre, in der das Quecksilber durch den Luftdruck zurückgehalten und am Ausfließen verhindert wird. Wir schütten jetzt in unser Glasrohr soviel Quecksilber zu, bis der Höhenunterschied in beiden Schenkeln 76 cm beträgt, so daß der Druck verdoppelt ist. Die Folge ist eine Verringerung des von der Luft erfüllten Raumes genau auf die Hälfte (Abb. 9 II). Erhöhe ich durch Fortsetzung des Versuchs den Druck auf im ganzen drei Atmosphären, so geht der Luftraum auf den dritten Teil zurück (Abb. 9 III). Druck und Gasraum (Volumen) verhalten sich also genau umgekehrt zueinander; in dem Maße, in dem der eine zunimmt, nimmt der andere ab. Mit demselben Druck, mit dem das Gas gedrückt wird, drückt das Gas natürlich wieder, sonst würde es ja noch mehr nachgeben.

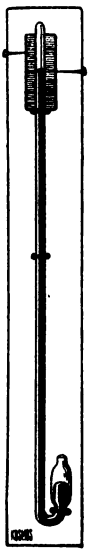


Abb. 10. Quecksilberbarometer.

Was geschieht, wenn wir jetzt den Druck unverändert lassen, aber die von dem Quecksilber abgesperrte Luftmenge erwärmen? Sie dehnt sich dann aus, ähnlich wie der Quecksilberfaden im Thermometer. Auch diese Ausdehnung erfolgt, wie Gay-Lussac und Dalton fanden, durchaus gesetzmäßig; sie beträgt, wenn der Druck gleich bleibt, bei der Erhöhung der Temperatur um 1° genau $^1/_{273}$ desjenigen Raumes, den das Gas bei 0° einnimmt. Verhindert man eine Ausdehnung bei der Erwärmung, so nimmt der Druck in demselben Betrage zu, während er bei einer Abkühlung um 1° um diesen Betrag abnimmt.

Das Auffällige ist nun, daß sich alle Gase in dieser Hinsicht ganz gleich verhalten, gleichviel ob man Luft, reinen Sauerstoff, Salzsäure, Ammoniak, Wasserdampf bei genügend hoher Temperatur oder sonst ein Gas zu den Versuchen verwendet. Die individuelle chemische Natur scheidet dabei ganz aus. Wenn man Stoffe vergast, so verhalten sie sich nach der Vergasung in bezug auf Druck, Rauminhalt und Temperatur eines wie das andere, genau so, wenn man einen anschaulichen Vergleich wählen will, wie Rekruten, die zum Militär ausgehoben werden. Vorher sind es noch Schneider, Schlosser, Kaufleute usw., nachher nur noch — Soldaten.

Abb. 11. Louis Joseph Gay Lussac. (Nach einem zeitgenössischen Stich.)

Wie kann unsere Atomtheorie dieses gesetzmäßige und gleichartige Verhalten der Gase erklären? Wenn wir 1 ccm Wasser (das ist 1 g) verdampfen, so geht es bei 100° in 1969 ccm Wasserdampf über. Wie macht es das? Es dehnt sich aus, sagt man. Das glauben wir; soll das aber eine Erklärung sein? Früher sagte man: es nimmt Wärmestoff auf und der trennt die Teilchen voneinander. Diese Deutung widerlegte schon Boyle durch eine einfache Wägung, durch die er feststellte, daß die bloße Erwärmung keine Gewichtszunahme im Gefolge hat, wie es die Aufnahme von Wärmestoff haben müßte. Oder man behauptete: Die Teilchen stoßen sich mit steigender Temperatur immer lebhafter ab. So dachte Dalton sich diese abstoßenden Kräfte als feste Druckrichtungen, als Kraftstrahlen, in der Art, wie sie Abb. 12 I, II und III wiedergibt. Das ist aber weiter nichts als ein anderer Ausdruck für die beobachteten Tatsachen, jedenfalls keine befriedigende, anschauliche Erklärung. Diese fand man erst, als man auf die Vorstellungen der alten Atomisten von der lebhaften Beweglichkeit der Atome zurückgriff und annahm, daß das Verhalten der Gase bei Temperatur- und Druckänderung nur der sichtbare Ausdruck der unsichtbaren Bewegungen ihrer Mole-

küle sei, und daß z. B. die Wärme jedes Körpers durch die Geschwindigkeit seiner kleinsten Teilchen bedingt sei. Die Verdampfung des Wassers können wir dann so auffassen, daß die Geschwindigkeit der Wassermoleküle bei der Erwärmung ständig steigt und schließlich so lebhaft wird, daß die Moleküle die gegenseitige Anziehung überwinden und mit großer Heftigkeit in die Luft hinein — verdampfen. Ist der Dampf in einen begrenzten Raum eingeschlossen, so trommeln sie äußerst lebhaft auf die Wände und erzeugen dadurch den Dampfdruck, mit dem wir unsere Dampfmaschinen treiben. Bei dieser Vorstellung ist die chemische Natur der einzelnen Moleküle allerdings nebensächlich; in Betracht kommt nur ihr Gewicht und ihre Geschwindigkeit, d. h. ihre Bewegungsenergie.

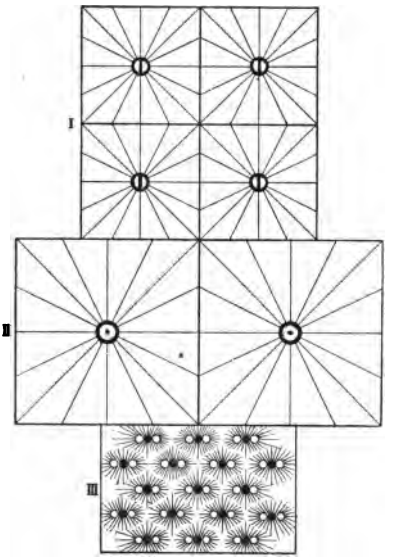


Abb. 12. Wie sich Dalton die abstoßenden Kräfte zwischen den Gasmolekülen des Stickstoffs (I), Wasserstoffs (II) und der Kohlensäure (III) dachte.

Das gleichmäßige Verhalten aller Gase bei Temperatur- und Druckänderung ließ bei Avogadro und bei Ampère die Vermutung entstehen, daß die Entfernung der Gasmoleküle voneinander nur durch die ausdehnende Kraft der Wärme und durch den Druck bestimmt wird, und daß diese Entfernungen bei derselben Temperatur und demselben Druck gleich groß sind. Das war eine Schlußfolgerung, für die kein zwingender Beweis vorlag, die aber sehr verlockend war, denn aus ihr folgte sofort, daß in gleich großen Räumen bei Temperatur- und Druckgleichheit gleich viel Moleküle enthalten sind; dann hatte man auch ein einfaches Mittel zur Hand, die Molekulargewichte gasförmiger Stoffe direkt miteinander zu vergleichen; man brauchte dazu nur das Gewicht gleicher Raumteile der Gase bei gleicher Temperatur und gleichem Druck zu bestimmen.

Wir könnten dann direkt wägen, wievielmal so schwer ein Molekül Wasser wie ein Molekül Wasserstoff ist und könnten berechnen, aus wieviel Atomen die Moleküle bestehen. Einen ähnlichen Gedanken hatte auch Dalton; er gab ihn aber bald wieder auf, da andere, wichtige Beobachtungen sich scheinbar mit ihm nicht gut vereinen ließen.

Gay-Lussac hatte sich für die Raumverhältnisse bei chemischen Umsetzungen von Gasen interessiert und hatte dabei äußerst interessante Feststellungen machen können. Er fand z. B., daß sich 100 Raumteile Ammoniakgas mit genau 100 Raumteilen Salzsäure zu neutralem Salmiak vereinigen, daß sich 100 Raumteile Wasserstoff mit 50 Raumteilen Sauerstoff zu 100 Raumteilen Wasserdampf verbinden, daß sich 100 Raumteile Stickstoff mit 50, mit 100, mit 200 Raumteilen Sauerstoff zu verschiedenen Stickoxyden vereinigen, deren es übrigens noch mehr gibt. Gay-Lussac fand also, daß die Raumverhältnisse, in denen die Gase sich vereinigen, vor und nach der Umsetzung verblüffend einfache sind.

Wie steht es nun angesichts dieser Tatsachen mit unserer Annahme, daß gleich große Räume gleich viel Moleküle enthalten? Nehmen wir den einfachsten Fall, die Vereinigung von Wasserstoff mit Chlor zu Chlorwasserstoff oder Salzsäuregas.*) Dem Raume nach vereinigt sich z. B. 1 l Wasserstoff mit 1 l Chlor zu 2 l Salzsäure. Müßten da nicht in 1 l Salzsäuregas halb so viele Teile enthalten sein wie in 1 l Wasserstoff? Beim Wasser liegt das Verhältnis ähnlich, nur verbinden sich 2 l Wasserstoff mit 1 l Sauerstoff zu 2 l Wasserdampf. Diese Tatsachen könnte man sich durch folgende Darstellung der Abb. 13a und b veranschaulichen, in der die Kreise die Atome bedeuten sollen:

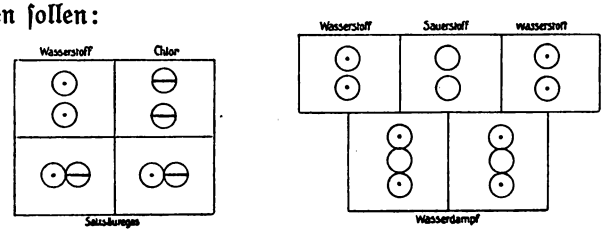


Abb. 13 a und b.

Dadurch wäre unsere schöne Annahme widerlegt.

*) Das geschieht, wenn man sie im Dunkeln mischt und dann belichtet, explosionsartig.

Hier kam Avogadro auf einen in seiner Einfachheit genialen Ausweg. Er wurde ebenso wie Ampère gerade durch die eben besprochenen Versuche von Gay-Lussac in seiner Hypothese, daß die Gase in gleichen Räumen bei Temperatur- und Druckgleichheit gleich viel Moleküle enthalten müßten, bestärkt, nur machte er, um die eben entgegengehaltene Schwierigkeit auszuschalten, die Zusatzannahme, daß auch schon die kleinsten Teilchen der Elementargase, z. B. vom Wasserstoff, Sauerstoff, Chlor usw., zusammengesetzt seien, und zwar aus zwei gleichen Atomen bestehen. Es tritt dann einfach, wie im Tanzsaal, Umordnung der Paare ein. Die oben gegebene Darstellung würde jetzt auf folgende Weise umzuändern sein:

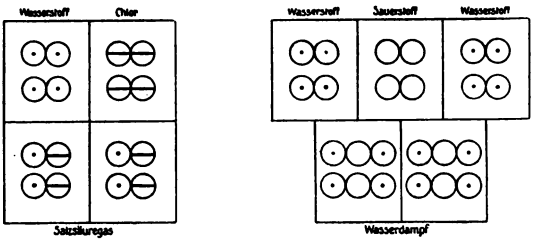


Abb. 14 a und b.

Wir sehen sofort, daß die Rechnung jetzt stimmt.

Das war ein außerordentlich glücklicher Einfall.*) Trotzdem vermochte sich der Grundgedanke noch nicht zu allgemeiner Anerkennung durchzusetzen. Das lag an verschiedenen Umständen. Zunächst versteifte sich Avogadro auf die an und für sich gar nicht notwendige Annahme, daß die Gasmoleküle aller Elemente aus zwei Atomen bestehen müßten. Damit kam man aber wieder in die Brüche. Der Schwefeldampf z. B. kommt erst bei über 1000° in den Zustand, in dem sein spezifisches Gewicht im Verhältnis zu Sauerstoff und Wasserstoff derartig ist, daß man sein Molekül als zweiatomig annehmen kann. Bis zu 500° aber ist er dreimal so schwer; sein Molekül müßte unter 500° also aus sechs Atomen bestehen. Da die Natur sich nicht nach unseren Gedanken richtet, sondern wir in unseren Gedanken den richtigen Anschluß an die Natur finden müssen, wenn

*) Ampère hatte einen ähnlichen gehabt, nur hatte er die ganz überflüssige Annahme gemacht, daß die kleinsten Teilchen der Elementargase aus 4 Atomen bestehen.

wir sie begreifen wollen, so müssen wir nachgeben und uns in diesem Fall zu der Annahme bequemen, daß die Moleküle von Elementargasen auch aus mehr als zwei Atomen bestehen können. Wir können das um so eher, als wir dadurch obendrein noch das Hauptgesetz retten, daß in gleichen Räumen die gleiche Anzahl von Molekülen vorhanden ist. Dieses überaus wichtige Avogadrosche Gesetz erlaubt uns, das Gewichtsverhältnis zu bestimmen, in dem die Moleküle verschiedener Gase zueinander stehen; es ist gleich dem Gewichtsverhältnis gleicher Gasräume, z. B. von 1 l, bei gleicher Temperatur und gleichem Druck. Als Vergleichssubstanz dient wieder das leichteste Gas, der Wasserstoff. Da sein Molekül aus zwei Atomen besteht, so setzt man es gleich 2. Da 1 l Sauerstoff 16 mal so viel wiegt als 1 l Wasserstoff,*) so beträgt sein „Molekulargewicht" 32 und sein „Atomgewicht" die Hälfte, also 16.**) 1 l Wasserdampf von 100° wiegt 9 mal so viel wie 1 l Wasserstoff von 100°, sein Molekulargewicht ist also 18, d. h. es besteht aus 2 Atomen Wasserstoff vom Atomgewicht 1 und einem Atom Sauerstoff vom Atomgewicht 16. Nehmen wir noch als letztes Beispiel unsern gewöhnlichen Alkohol. Durch die Analyse können wir feststellen, daß in ihm auf 2 Atome Kohlenstoff 6 Atome Wasserstoff und ein Atom Sauerstoff kommen. Die Analyse sagt aber gar nichts darüber aus, wieviel Atome Kohlenstoff im Molekül enthalten sind; es können 2, 4, 6 oder noch mehr Vielfache von 2 sein. Hier hilft uns die Molekulargewichtsbestimmung aus dem spezifischen Gewicht des Alkoholdampfes. 1 l Alkoholdampf erweist sich als 23 mal so schwer wie 1 l Wasserstoff unter denselben Druck- und Temperaturverhältnissen. Dann ist sein Molekulargewicht 46, so daß sein Molekül tatsächlich aus 2 Atomen Kohlenstoff, dessen Atomgewicht 12 ist, 6 Atomen Wasserstoff und 1 Atom Sauerstoff besteht. Während das „Atomgewicht" eine ganz unveränderliche Zahl ist, kann das Molekulargewicht schwanken, für Schwefel z. B. von 192 bei 500° auf

*) 1 l Sauerstoff wiegt bei 100° 1,045 Gramm.
1 l Wasserstoff wiegt bei 100° 0,066 Gramm.
1 l Wasserdampf von 100° wiegt 0,590 Gramm.

**) Man beachte auch hier wie später immer wieder die ausschlaggebende Bedeutung der Tatsachen; der eben herausgearbeitete naturwissenschaftliche Begriff „Molekül" erscheint bei genauem Hinsehen nur als eine andere, kürzere Benennung der experimentellen Tatsachen, die auch ohne den Molekülbegriff ihre außerordentliche Bedeutung behalten.

64 bei 1000°. Es gibt auch Gase, verschiedene Umstände sprechen dafür, deren Molekül nur aus einem Atom besteht. Das ist z. B. bei den sog. Edelgasen, wie Helium, Argon usw., der Fall, dann bei verschiedenen Metalldämpfen wie Quecksilber, Zink, Natrium u. a.

Einen schweren Kampf hatte das Avogadrosche Gesetz noch mit der Aufhellung der molekularen Zusammensetzung des gasförmigen Salmiaks zu bestehen. Salmiak entsteht in ziemlich lebhafter Reaktion und unter Wärmeentwicklung, wenn man Salzsäure und Ammoniak zusammenschüttet. Er bildet nach dem Verdunsten des Wassers ein weißes Salz, das sich beim Erhitzen verflüchtigt. Aus seiner Zusammensetzung berechnet sich sein Molekulargewicht zu 17 (Ammoniak) + 36,5 (Salzsäure) = 53,5. Bestimmt man das Molekulargewicht des Gases, so ist es aber nur 26,75. Was nun? Sind hier bloß halb so viel Moleküle im Liter Gas, daß es so leicht ist? Dann würde das Gesetz doch falsch sein? Der Ausweg, der es retten könnte, liegt nahe: Nehmen wir an, das Salmiakmolekül spalte sich bei der Vergasung in zwei Teile, in Ammoniak und Salzsäure, aus denen es entstanden ist, und alles ist wieder in schönster Ordnung. Diese Annahme ist um so wahrscheinlicher, als man für das Molekulargewicht des Ammoniumkarbonates, einer Verbindung von zwei Molekülen Ammoniak und einem Molekül Kohlensäure, im Gaszustand nur den dritten Teil des erwarteten fand. Hier wäre also das Molekül in seine drei Bestandteile zerfallen. Aber diese Zersetzung müßte auch nachgewiesen werden, sonst wäre dieser Ausweg von sehr zweifelhaftem Wert. Der Nachweis ist tatsächlich geglückt! Läßt man Salmiakdampf durch eine Glasröhre strömen, die an dem einen Ende in einen dicht anschließenden Tonzylinder mündet, so muß der Dampf durch dessen Poren hindurch; dies müßte den leichteren Gasteilchen leichter gelingen, da sie sich rascher bewegen wie die schwereren. Untersucht man das austretende Gas mit feuchtem, roten und blauen Lackmuspapier, so zeigt sich, daß das blaue Papier unverändert bleibt, während das rote sich blau färbt. Lackmus ist ein Farbstoff, der mit Säuren rote, und mit Alkalien blaue Farbtöne bildet. Das austretende Gas reagiert also alkalisch, und das kann nur dadurch verursacht sein, daß es einen Überschuß an Ammoniak enthält. Untersucht man das in der Glasröhre zurückbleibende Gas, so zeigt sich, daß in ihm das blaue Lackmuspapier rot wird. Hier überwiegt also die Salzsäure. Der Versuch liefert somit

den Beweis, daß im Salmiakdampf Ammoniak und Salzsäure selbstständig nebeneinander vorhanden sind.

So hat sich die Avogadrosche Regel bisher noch allen Anfechtungen gewachsen gezeigt und sich siegreich behauptet. Sie gibt uns die Möglichkeit, das Verhältnis der Molekulargewichte zueinander und die Anzahl der Atome in einem Molekül zu bestimmen, und zwar zunächst, wie wir gesehen haben, bei den gasförmigen Stoffen. Aber sie sollte nicht auf dieses Gebiet beschränkt bleiben. Ihr Geltungsbereich griff auch hinüber in das Gebiet der Lösungen. Den Anlaß hierzu gaben folgende Beobachtungen.

Füllt man eine gutverkorkte Flasche, deren Boden abgesprengt ist, mit Alkohol, überbindet sie dicht mit einem Stück Schweinsblase und setzt sie unter Wasser, so sieht man, wie die Haut sich vorwölbt und schließlich dem starken Innendruck nachgibt und zerreißt. Wie ist das zu erklären? Wir wissen, daß der Alkohol nur sehr viel schwerer durch die Blase hindurchkann als das Wasser. Dieses wird, sowie es durch die Blase hindurch ist, sich infolge der gegenseitigen unbegrenzten Löslichkeit von Alkohol und Wasser sofort in dem Alkohol verteilen. Immer mehr Wasser strömt nach, so lange, bis sein Druck auf beiden Seiten der Blase gleich groß ist, oder, was auf dasselbe hinauskommt, bis gleich viel der beweglichen Wassermoleküle sowohl in das Glas hinein als aus ihm heraus wandern. Auch der Alkohol wird durch die Blase hindurchgehen und sich auf der anderen Seite im Wasser verteilen. Da er aber nur sehr viel langsamer durch die Blase hindurchgelassen wird, wie das Wasser, so wird zunächst auf der einen Seite, wenn der Wasserdruck sich ausgeglichen hat, ein Überdruck des Alkohols bestehen. Er ist es, der die Blase auftreibt. Statt des Alkohols kann man auch eine wäßrige Zuckerlösung nehmen, dann beobachtet man dasselbe. Hier werden die Zuckermoleküle zurückgehalten und erzeugen auf der einen Seite den Überdruck.

Es wäre interessant, die Größe dieses Druckes zu messen. Das ist nicht schwer. Man braucht nur durch die Korkstopfen ein von beiden Seiten offenes, langes Glasrohr in die Zuckerlösung zu stecken. Dann wird der Druck sich darin äußern, daß er die Zuckerlösung in der Glasröhre in die Höhe drückt (s. Abb. 15); er ist dann durch die Höhe der Flüssigkeitssäule direkt meßbar. Man nennt ihn „osmo-

tischen Druck".*) Eine genaue Messung mit Hilfe einer für Zucker ganz undurchlässigen, für Wasser aber durchlässigen Scheidewand ergab, daß eine 1proz. Zuckerlösung bei 15,5° einen Druck von 0,684, bei 36° von 0,764 Atmosphären ausübt. Der Druck steigt also genau wie bei Gasen mit der Temperatur und, wie sich bei einer Umrechnung herausstellt, auch genau in derselben Weise.

Das Molekulargewicht des Rohrzuckers, der aus 12 Atomen Kohlenstoff, 22 Atomen Wasserstoff und 11 Atomen Sauerstoff besteht ($C_{12}H_{22}O_{11}$ schreibt der Chemiker), beträgt 342. Löst man 342 g Rohrzucker (man nennt dies ein „Grammmolekül") in 1 l Wasser,

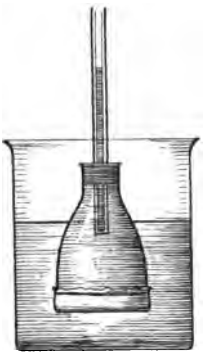


Abb. 15. Der osmotische Druck treibt die Flüssigkeit in der Röhre in die Höhe.

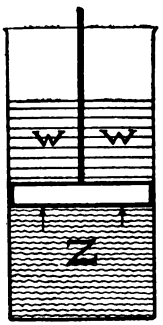


Abb. 16 soll die Ähnlichkeit der Druckwirkung einer Lösung (Z) mit der eines Gases veranschaulichen.

so beträgt der osmotische Druck dieser Lösung bei 22,5° 24,24 Atm., erreicht also eine stattliche Höhe. Löst man nur halb so viel, also 171 g in 1 l, so beträgt der Druck auch nur die Hälfte, 12,12 Atm. Also wieder eine merkwürdige Übereinstimmung mit den Gasgesetzen. Sie wird noch verblüffender, wenn man ausrechnet, welchen Raum ein Grammmolekül eines Gases, z. B. 2 g Wasserstoff, bei 22,5° und 24,24 Atm. Druck einnehmen würde; das ist nämlich auch 1 l. Wir stehen also vor dem überraschenden Ergebnis, daß der gelöste Stoff sich gerade so verhält, als ob das Lösungsmittel gar nicht vorhanden wäre und er diesen Raum als Gas erfüllte. Folgende Anordnung macht das anschaulich: In ein Glas-

*) Das Wort Osmose leitet sich von einem griechischen Wort ab, das Antrieb, Stoßen, Drängen, bedeutet.

gefäß (siehe Abb. 16) gieße ich zuerst eine Zuckerlösung, setze dann einen dicht an die Wand anschließenden aber beweglichen Stempel darauf, der zwar Wasser, aber nicht Zucker durchläßt,*) und schütte oben auf reines Wasser. Das Wasser drückt von oben und unten gleich stark. Die Zuckermoleküle stoßen nur von unten nach oben und treiben den Stempel in die Höhe. Durch einen entsprechenden Gegendruck, ein Gewicht etwa, kann ich das verhindern. Erhöhe ich den Gegendruck, so dringt wohl Wasser, nicht aber Zucker durch den Stempel nach oben, die Zuckerlösung wird konzentriert; vermindere ich den Gegendruck, so wird der Stempel nach oben getrieben, Wasser geht nach unten hindurch, und die Zuckerlösung wird verdünnt. Der Zucker verhält sich also genau so, als ob er den Raum allein als Gas einnähme und darüber sich ein Vakuum befände. Wie der Zucker, verhalten sich auch viele andere Stoffe.

Man kann also auch bei Lösungen sagen: Wenn bei gleicher Temperatur der osmotische Druck zweier gelöster Stoffe gleich groß ist, so enthalten sie in gleichen Räumen gleich viel Moleküle; die in 1 l z. B. enthaltenen Mengen geben das Verhältnis ihrer Molekulargewichte an. Die Aufklärung dieser Verhältnisse, diese Erweiterung der Avogadroschen Regel, verdanken wir Raoult und Van't Hoff.

Diese außerordentlich interessanten Beziehungen der gelösten Stoffe können natürlich dazu benutzt werden, unbekannte Molekulargewichte auf experimentellem Wege festzustellen. Schwierig ist es dabei nur, immer geeignetes Material für die Wände zu finden, die wohl das Lösungsmittel, aber auf keinen Fall den gelösten Stoff hindurchlassen sollen. Glücklicherweise stehen andere Eigenschaften von Lösungen in so enger zahlenmäßiger Beziehung und innerer Abhängigkeit von dem osmotischen Druck, daß man sie statt seiner

*) Eine Haut, durch die Wasser sehr leicht, Zucker aber gar nicht hindurchgelassen wird, kann man sich leicht auf chemischem Wege herstellen. Man füllt einen Tonzylinder mit verdünnter Kupfersulfatlösung und taucht ihn in eine Lösung von Ferrozyankalium. Die Salzlösungen dringen in die poröse Wand ein, und dort, wo sie sich treffen, entsteht durch Umsetzung des Kupfersulfats mit dem Ferrozyankalium Ferrozyankupfer, das in Wasser unlöslich ist. Es verstopft die Poren der Tonzelle und bildet die für den Zucker undurchlässige Wand. Sprengt man den Boden der Tonzelle ab, so kann man ihn als Material für den Stempel in dem oben beschriebenen Versuch benutzen.

benutzen kann; es sind das, wie Van't Hoff nachwies, die Siede- und die Gefriertemperatur der Lösungen. Der Siedepunkt liegt um so höher, der Gefrierpunkt um so tiefer, je größer der osmotische Druck, also die Konzentration der Moleküle des gelösten Stoffes ist. Man hat in der Erhöhung der Siedetemperatur und der Erniedrigung des Schmelzpunktes einer Lösung gegenüber dem reinen Lösungsmittel, die für die gleiche Anzahl gelöster Moleküle gleich groß sind, ein einfaches Mittel, das unbekannte Molekulargewicht eines gelösten Stoffes zu bestimmen.

Abb. 17. J. H. Van't Hoff.

Auch hier wurden bald scheinbare Ausnahmen gefunden, die, ähnlich wie bei den Gasen, das Gesetz in Frage stellten. So gaben wäßrige Lösungen von Kochsalz, Salzsäure, Natronlauge und ähnlichen Stoffen viel höhere Druckwerte, als man erwartete, so daß z. B. bei der wäßrigen Salzsäure die Anzahl der Moleküle doppelt so groß, das Molekulargewicht aber nur halb so groß erschien als bei dem Salzsäuregas. Man half sich hier wie bei dem zu großen Dampfdruck des Salmiaks. Der schwedische Forscher Arrhenius schlug vor, einfach anzunehmen, daß z. B. das Gasmolekül Salzsäure in der Lösung in zwei Teile zerfiele, in Wasserstoff und in Chlor; das Molekül Kochsalz würde dann in seine Atome Natrium und Chlor gespalten sein. Das war auch wieder so ein unglaublich kühner Gedanke, gegen den sich im Anfang das Gefühl sträubte; wie sollten Natrium und Chlor im Wasser vorhanden sein können, ohne daß das Natrium sofort das Wasser zersetzte oder beide sich miteinander verbänden? Um das erklärlich zu machen, mußte man zu einer zweiten Annahme greifen, daß nämlich diese Atome nicht gewöhnliche, sondern elektrisch geladene Atome seien. (Man sieht, ein guter Naturwissenschaftler bedarf ebenso-

sehr der Phantasie wie ein Künstler.) Nun stimmten wenigstens die Rechnungen. Es fanden sich aber auch zahlreiche andere Tatsachen, die die anfangs phantastisch erscheinende Hypothese stützten, so daß sie jetzt allgemein angenommen ist. So gab sie z. B. eine glückliche Erklärung des Problems der Elektrolyse, d. h. der Zerlegung von Stoffen durch den elektrischen Strom. Es würde zu weit führen, hier näher darauf einzugehen, aber man sieht, daß die Atom- und Molekularhypothese immer, selbst unter den scheinbar schwierigsten Verhältnissen imstande ist, ein einfaches System anschaulicher Erklärungen zu bilden.

Es mag nur noch von dem osmotischen Druck erwähnt werden, daß er im Pflanzenreich eine außerordentlich große Rolle spielt. Die Pflanzenzellen werden alle von einer schützenden Haut umgeben, die für viele eingeschlossene lösliche Stoffe undurchlässig ist, während das Wasser ungehindert durch sie hindurchdringen kann. Es tritt deshalb im Innern dieser Zellen ein hoher Druck auf, der oft viele Atmosphären beträgt und die Zellwände prall auftreibt. Bei Wassermangel läßt dieser Druck nach, die Zellhäute schrumpfen zusammen; daher sehen wir die Blätter bei anhaltender Dürre welk und durstgequält herabhängen.

Doch zurück zu unseren Molekülen. Wir haben sie bisher nur bei gasförmigen oder ähnlich weitläufig verteilten Stoffen beobachtet, bei denen jedes Molekül selbständig ist. Aber schon bei hohen Konzentrationen der Gase und gelösten Stoffe verlieren die eben besprochenen Gesetzmäßigkeiten ihre Geltung, da alle möglichen Einflüsse auftreten, die zu Abweichungen führen. Es muß sich z. B. der Rauminhalt des einzelnen Moleküls geltend machen und die Zusammendrückbarkeit verkleinern; andrerseits aber wächst diese wieder unverhältnismäßig stark, so daß wir annehmen müssen, daß bei genügender Annäherung der Moleküle auch eine gegenseitige Anziehung eintritt, die ja im festen Zustand außerordentlich stark werden kann. In diesem Falle fragt es sich, ob unsere Gasmoleküle als solche noch bestehen oder ob sie zu größeren Komplexen zusammentreten? Sind uns Eigenschaften von Flüssigkeiten und festen Körpern bekannt geworden, die einen Vergleich von Molekulargewichten gestatten? Bei den tropfbaren Flüssigkeiten ist dies der Fall; bei ihnen gibt z. B. die Oberflächenspannung eine solche Handhabe.

Was ist Oberflächenspannung? Ihre Wirkung kennt jeder, denn jeder hat schon einmal Seifenblasen fliegen lassen. Erzeugt man eine Seifenblase an einem Pfeifenkopf und läßt die Öffnung des Mundstückes frei, so zieht die Seifenblase sich zusammen. Sie folgt dabei dem Zuge der Oberflächenspannung, deren Größe man messen kann. Diese Spannung ist es auch, die einem Wassertropfen oder einem Quecksilberkügelchen die Kugelgestalt verleiht, so daß es aussieht, als ob sie in einer straff gespannten Gummihaut steckten, die keine Unebenheit zuläßt. Die Ursache dieser Oberflächenspannung sehen wir in der Anziehungskraft der Moleküle aufeinander. Sie ist bei jedem Stoff eine andere. Wir wollen einmal die des Wassers messen. Dazu nehmen wir einen Drahtbügel, wie ihn beistehende Abb. 18 zeigt, und dessen Öffnung 1 cm breit ist. In dieser Öffnung ziehen wir mit einem Draht, der an dem Bügel gleitet, eine Wasserhaut aus. Durch ein an den Draht angehängtes Gewicht können wir den Zug gerade so groß machen, daß die Wasserhaut bis zur Grenze ihrer Haltbarkeit gespannt wird. Dann ist die Größe des Zuges gleich dem angehängten Gewicht und dem Gewicht des Drahtes zusammen, das werden in unserem Falle 0,15 g sein. Denken wir daran, daß die Haut zwei Oberflächen hat, so kommt auf jede ein Zug von 0,075 g. Diese Größe ist die Oberflächenspannung des Wassers; mit dieser Kraft sucht sich ein Streifen Wasseroberfläche von 1 cm Breite zusammenzuziehen. Die Oberflächenspannung verändert sich aber auch mit der Temperatur, und zwar nimmt sie, wie jeder voraussagen kann, mit steigender Temperatur ab, da sie beim Siedepunkt der Flüssigkeit verschwindet. Diese Änderung der Oberflächenspannung mit der Temperatur ist die Größe, die für ein Grammmolekül aller flüssigen einheitlichen Stoffe ungefähr gleich groß ist und ihren Vergleich zuläßt. Es hat sich gezeigt, daß die Flüssigkeitsmoleküle meist noch die Größe der Gasmoleküle haben. Bei manchen Stoffen dagegen, z. B. bei Wasser, Alkohol und Essigsäure, haben sich Komplexe aus mehreren Gasmolekülen gebildet. Die genaue Größe dieser Komplexe ist aber noch nicht festgestellt.

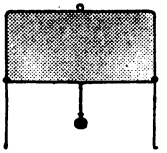


Abb. 18.

Für die Molekulargröße der festen Körper haben wir gar keinen sicheren Anhalt.

Dafür liefert der feste Zustand der Stoffe überaus wichtige

Daten zur Nachprüfung der Atomgewichte. Wir hatten diese Gewichte bisher aus den Gewichtsmengen abgeleitet, mit denen die Stoffe sich untereinander verbinden, ferner aus der Größe der Moleküle, auch aus den Volumverhältnissen, in denen die Gase sich chemisch vereinigen. Zur Feststellung des Atomgewichtes eines Elementes bestimmt man einmal das Molekulargewicht von möglichst vielen Verbindungen dieses Elementes, und dann die genaue Zusammensetzung der Moleküle; das gesuchte Atomgewicht ist dann die kleinste Gewichtsmenge, die von dem Element in den Molekülen gefunden wurde. Die Nachprüfung dieser Berechnungen wird durch die Atomwärmen fester Stoffe ermöglicht, mit denen es folgende Bewandtnis hat.

Nehmen wir 1 kg Wasser von 0° und gießen es zu 1 kg Wasser von 2°, so wird jeder den Erfolg voraussagen können. Die Temperatur wird sich ausgleichen, und wir erhalten 2 kg Wasser von 1°. Welche Temperatur erhalten wir aber, wenn wir 1 kg Eisen von 0° in 1 kg Wasser von 2° stellen? Das Thermometer wird nur auf 1,876° sinken. Um 1 kg Eisen von 0° auf 1° zu erwärmen, genügen schon 114 g Wasser von 2°, das sich dabei natürlich auf 1° abkühlt. Wir sehen daraus, daß das Eisen zu einer bestimmten Temperaturerhöhung viel weniger Wärme braucht als das Wasser. Man nennt die Wärmemenge, die 1 g Wasser bei der Abkühlung um 1° abgibt, bzw. bei der Erwärmung um 1° aufnimmt, eine Grammkalorie und bezeichnet sie mit 1 cal. 1 g Eisen gibt natürlich bei der Abkühlung um 1° viel weniger Wärme ab. Sie genügt gerade, um 1 g Wasser um 0,114° zu erwärmen, beträgt also 0,114 cal. Diese Zahl 0,114 nennt man die spezifische Wärme des Eisens. Die des Bleis ist noch geringer und zwar 0,031. Zum Zeichen, wie verschieden die spezifischen Wärmen der einzelnen Stoffe sind, seien noch einige angeführt. Die des Nickels ist 0,108, des Kupfers 0,095, des Quecksilbers 0,032 usw. Und nun sind wir auch gleich bei den Atomwärmen, denn um sie zu erhalten, brauchen wir nur jede der eben vorgeführten Zahlen der spezifischen Wärmen mit dem Atomgewicht des betreffenden Elementes zu multiplizieren. Man versteht also unter Atomwärme die Wärmemenge, die notwendig ist, um das Atomgewicht in Grammen des betr. Elementes um 1° zu erwärmen. Wir erhalten also für Eisen: $55{,}8 \times 0{,}114 = 6{,}41$; Blei: $207{,}1 \times 0{,}031 = 6{,}4$; Nickel: $58{,}7 \times 0{,}108 = 6{,}3$; Kupfer:

63,6 × 0,095 = 6,0. Das ist eine Überraschung! Wenn wir voreilig wären, würden wir weiter schließen, daß die Atomwärmen sämtlicher Elemente in festem Zustand nahezu gleich groß seien. Das trifft aber nicht allgemein zu. Elemente wie Kohlenstoff und Bor, deren Atomgewicht unter 35 liegt, und die dabei eine hohe Schmelztemperatur besitzen, haben bedeutend kleinere Atomwärmen; für Kohlenstoff beträgt sie z. B. nur 1,7. Diese Ausnahmen sind aber so gering an Zahl, daß unser Schluß für die meisten Elemente als gültig angesehen werden kann. Ist nun für ein Element die Größe des Atomgewichts zweifelhaft, so haben wir ein Mittel, uns zu entscheiden. Nehmen wir an, das Atomgewicht des Quecksilbers wäre unbestimmt. Aus der Untersuchung des Sublimats wissen wir, daß in dieser Chlorverbindung auf 35,5 g Chlor 100 g Quecksilber kommen. Wenn die Größe des Moleküls unbekannt wäre, wüßten wir nicht, ob das Atomgewicht des Quecksilbers 100, 200, 300 oder 400 betrüge, ob das Molekül also 1, 2, 3 oder 4 Atome Chlor enthielte. Hier hilft die Atomwärme. Die spezifische Wärme des Quecksilbers beträgt 0,032. 6,4 dividiert durch 0,032 ergibt rund 200, also ist das Atomgewicht des Quecksilbers 200, und im Molekül Sublimat sind zwei Chloratome enthalten. Dieses Ergebnis ist um so interessanter, als das Molekulargewicht des verdampften Quecksilbers auch 200 beträgt. Daher wissen wir, daß im Quecksilberdampf Molekül und Atom identisch sind, daß das Quecksilber beim Verdampfen in Atome zerstäubt.

So bekam man allmählich das Gewichtsverhältnis der Atome sämtlicher Elemente heraus (immer auf das Wasserstoffatom = 1 bezogen), und konnte nun daran gehen, die Elemente nach der Größe ihrer Atomgewichte zu ordnen. Es zeigten sich alle möglichen Regelmäßigkeiten, die schließlich zu einem sehr genauen Prüfstein für die gewählten Atomgewichte führten.

Schreibt man die Elemente in der Reihenfolge ihres Atomgewichtes hintereinander, so findet man, daß man Abschnitte machen kann, deren Anfangsglieder einander in ihrem chemischen Verhalten sehr ähnlich sind. Schreibt man diese Abschnitte untereinander (siehe Tabelle S. 42), so ergeben sich ganz gesetzmäßige Beziehungen in den Eigenschaften zwischen einem jeden Element und den nächsten, die es umgeben, Beziehungen, die für das ganze System gelten. Um diese Gesetzmäßigkeit nicht zu stören, ist man gezwungen, manchmal

Periodisches System der Elemente

Wasserstoff = 1. (Die Zahlen geben das Atomgewicht an).

Helium = 3,4	Lithium = 6,94	Beryllium = 9,1	Bor = 11	Kohlenstoff = 12	Stickstoff = 14	Sauerstoff = 16	Fluor = 19	—	—	—
Neon = 20,2	Natrium = 23	Magnesium = 24,3	Aluminium = 27,1	Silicium = 28,3	Phosphor = 31	Schwefel = 32,1	Chlor = 35,5	—	—	—
Argon = 39,9	Kalium = 39,1	Calcium = 40,1	Scandium = 44,1	Titan = 48,1	Vanadium = 51	Chrom = 52	Mangan = 54,9	Eisen = 55,84	Kobalt = 59	Nickel = 58,7
—	Kupfer = 63,57	Zink = 65,37	Gallium = 69,9	Germanium = 72,5	Arsen = 74,96	Selen = 79,2	Brom = 79,92			
Krypton = 82,9	Rubidium = 85,5	Strontium = 87,6	Yttrium = 89	Zirkonium = 90,6	Niobium = 93,5	Molybdän = 96	—	Ruthenium = 101,7	Rhodium = 102,9	Palladium = 106,7
—	Silber 107,9	Cadmium = 112,4	Indium = 114,8	Zinn = 119	Antimon = 120,2	Tellur = 127,5	Jod = 126,9			
Xenon = 130,2	Cäsium = 132,8	Barium = 137,4	Lanthan = 139	Cer usw. 140—178	Tantal = 181,5	Wolfram = 184	—	Osmium = 190,9	Iridium = 193,1	Platin = 195,2
—	Gold = 197,2	Quecksilber = 200,6	Thallium = 204	Blei = 207,1	Wismut = 208	—	—			
Niton = 222,4	—	Radium = 226,4	—	Thorium = 232,4	—	Uran = 238,5	—	—	—	—

Lücken in der Reihenfolge zu lassen, die andeuten, daß Elemente in sie hineingehören, die wir noch nicht kennen.

Als Lothar Meyer und Mendelejeff zum ersten Mal unabhängig voneinander diese Gruppierung vornahmen, waren diese Lücken noch sehr zahlreich. Sie reizten Mendelejeff, aus den umgebenden Elementen die chemischen und physikalischen Eigenschaften der noch unbekannten Elemente zu berechnen. Auf Grund dieser

Abb. 19. Modernes chemisches Laboratorium.
(Das Laboratorium von Prof. Dr. Willstätter im Kaiser Wilhelm-Institut.)

Studien beschrieb er zunächst drei damals unbekannte Elemente, die das Atomgewicht 44, 70 und 72,5 haben sollten, ganz genau. Einige Zeit später erlebte er und mit ihm die Wissenschaft den großen Triumph, daß seine Prophezeiungen eintrafen. Die drei Elemente wurden entdeckt und hatten tatsächlich die vorausgesagten Eigenschaften; sie heißen jetzt Scandium, Gallium und Germanium. Es war eine glänzende Rechtfertigung der Atomtheorie, ein Beweis, daß den Atomgewichten eine berechtigte, tiefere Bedeutung zukommt. Worin diese Bedeutung besteht, können wir mit Sicherheit noch nicht sagen. Man hat darüber die mannigfachsten Vermutungen ausgesprochen; sichere Forschungsergebnisse liegen aber noch nicht vor. Jedenfalls bildet dieses periodische System, dessen Anordnung verschiedentlich abzuändern und zu verbessern versucht worden

ist, einen schönen Schlußstein für die ganzen atomistischen Überlegungen; es bildet aber auch gleichzeitig den Ausgangspunkt für überaus zahlreiche, neue Untersuchungen, und diese Eigenschaft ist mindestens ebenso wertvoll.

Ihre größte Belastungsprobe und eine weitere Entwicklung sollte die Atomtheorie auf dem Gebiet der Kohlenstoffverbindungen erfahren. Diese Verbindungen unterscheiden sich so charakteristisch von allen anderen Stoffen, daß das seit dem alchmistischen Zeitalter ganz ungeheuer angewachsene Lehrgebäude der Chemie offiziell in zwei große Teile geschieden wird, von denen der eine als organische Chemie eben diese Kohlenstoffverbindungen, der andere als anorganische Chemie die Verbindung aller anderen Elemente umfaßt. (Abb. 19 zeigt ein neuzeitliches Laboratorium für organische Chemie.) Die Anzahl der Verbindungen, die der Kohlenstoff eingeht, ist so außerordentlich groß, daß diese Einteilung, die früher aus einem ganz anderen Grunde*) vorgenommen wurde, jetzt, nachdem dieser Grund schon lange hinfällig geworden ist, mit Recht beibehalten wird. Greifen wir, um uns ein Beispiel vor Augen zu führen, ein beliebiges anderes Element heraus, etwa das Eisen. Wie viele Verbindungen kennen wir vom Eisen mit Sauerstoff und Wasserstoff? Es sind höchstens ein Dutzend oder ein paar mehr. Was bedeutet diese Zahl aber gegenüber den vielen tausend Verbindungen, die der Kohlenstoff mit den beiden Elementen eingeht. Den Grund für diese seine Ausnahmestellung lehren uns die Molekulargewichtsbestimmungen kennen. Sie zeigen, daß sich in einem einzigen organischen Molekül eine ungewöhnlich große Zahl von Kohlenstoffatomen anhäufen und miteinander verketten kann.

Während man es in der anorganischen Chemie bei einer bestimmten prozentualen Zusammensetzung immer mit nur einem einzigen Stoff zu tun hatte (jetzt sind auch hier schon Ausnahmen bekannt), fand man in der organischen bald, daß die verschiedensten Stoffe dieselbe Zusammensetzung haben können. Der erste Fall dieser Art, der bekannt wurde, erregte nicht geringes Aufsehen. Er brachte zwei Gelehrte hart aneinander, da jeder vermutete, daß der andere einen Fehler begangen hätte. Als einfachstes Beispiel kann man das Azetylen und das Benzol anführen, deren Verschiedenheit jeder-

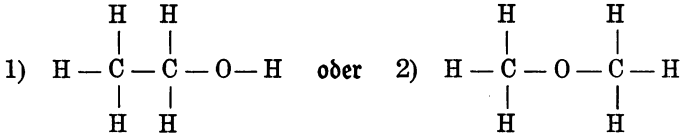
*) Man nahm früher an, die Kohlenstoffverbindungen könnten nur in Organismen durch die sogenannte Lebenskraft erzeugt werden, daher der Name: Organische Chemie.

mann bekannt ist. Sie bestehen beide aus 92,3 % Kohlenstoff und 7,7 % Wasserstoff. Den Grund ihrer verschiedenen Natur enthüllt uns das Molekulargewicht; es beträgt für das Azetylen 26, für das Benzol 72, d. h. das Molekül des Azetylens (C_2H_2) besteht aus 2 Atomen Kohlenstoff und 2 Atomen Wasserstoff, während das des Benzols (C_6H_6) je 6 von ihnen enthält. Dies zeigt, wie außerordentlich wichtig die Bestimmung des Molekulargewichtes (siehe S. 32) für die organische Chemie ist.

Bald stellten sich aber Fälle ein, in denen auch die Molekulargewichte zweier durchaus verschiedener Stoffe bei gleicher prozentualer Zusammensetzung gleich waren. Ein bekanntes einfaches Beispiel hierfür bildet der gewöhnliche Weingeist oder Äthylalkohol und der Methyläther. Der eine siedet bei 78°, der andere ist ein Gas, das erst bei —23° flüssig wird. Ebenso ist das chemische Verhalten beider durchaus verschieden. Beider Moleküle aber bestehen aus zwei Atomen Kohlenstoff, sechs Atomen Wasserstoff und einem Atom Sauerstoff (C_2H_6O). Wie kann die Atomtheorie diese Tatsachen erklären? Sie hat dazu ein ganz neues, bisher unbenutztes Register aufgezogen, nämlich die verschiedene Anordnungsmöglichkeit der Atome im Molekül. Um sie in ihrer ganzen Tragweite zu verstehen, müssen wir uns eine besondere Eigenschaft der Atome etwas genauer ansehen.

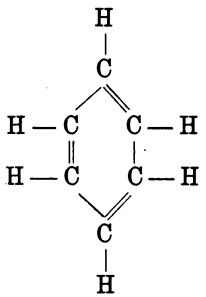
Vom Wasserstoff weiß man, daß er nie mehr als ein anderes Atom an sich zu fesseln vermag, in der Salzsäure z. B. nur ein Chloratom. Man nennt ihn deshalb „einwertig", zum Unterschied von anderen Elementen, die in dieser Hinsicht weitherziger sind. Der Sauerstoff ist z. B. im Wasser mit zwei Atomen Wasserstoff verbunden, er wird deshalb als „zweiwertig" bezeichnet. Entdeckt man eines Tages, daß er noch mehr Atome aufnehmen kann, (das ist in Wirklichkeit schon geschehen), so wird man seine Wertigkeit eben höher einschätzen; meistens ist er aber tatsächlich „zweiwertig". Der Stickstoff, der gleichsam das tragende Atom des Ammoniaks und der Salpetersäure ist, erweist sich in manchen Fällen als fünfwertig, z. B. im Salmiak und der Salpetersäure; im Ammoniak aber, wo er nur mit drei Atomen Wasserstoff verbunden ist (NH_3), ist er dreiwertig. Das Kohlenstoffatom ist im Höchstfalle vierwertig, z. B. im Grubengas oder Methan (CH_4), in dem es von vier Wasserstoffatomen besetzt ist. Nun kommt die gesuchte Erklärung. Sind in einem Molekül mehrere „mehrwertige" Atome vorhanden, so ist natürlich eine ver-

schiedenartige Anordnung möglich. Nehmen wir z. B. den Äthylalkohol und den Methyläther C_2H_6O vor; in ihnen müssen sich die „einwertigen" Wasserstoffatome H um die „vierwertigen" Kohlenstoffatome C und das „zweiwertige" Sauerstoffatom O gruppieren. Wir können, wenn alle „Wertigkeiten" in Aktion treten sollen, folgende anschauliche Gruppierungen vornehmen:



in denen die Buchstaben die Atome und die Striche den Ausgleich der anziehenden Kräfte bedeuten; andere Anordnungen sind nicht denkbar. Diese Gruppierung ist kein müßiges Spiel, denn sie gibt eine genügende Erklärung für das verschiedene chemische Verhalten der beiden Stoffe. Dem Äthylalkohol, in dem ein Wasserstoffatom ähnlich wie im Wasser mit einem Sauerstoffatom verbunden sein muß, kommt die erste „Konstitutionsformel" (so nennt man diese Gruppierungsbilder) zu, dem Methyläther die zweite.

Auch die verschiedene Molekulargröße des vorher erwähnten Azetylens und Benzols wird durch solche Konstitutionsformeln erklärt. Im Azetylen, in dem mit zwei Kohlenstoffatomen nur zwei Wasserstoffatome verbunden sind, nimmt man an, daß die übrig bleibende Anziehungskraft der Kohlenstoffatome sich gegenseitig absättigt und schreibt das in folgender Weise: $H-C\equiv C-H$. Für das Benzol hat sich die folgende Anordnung in Hinsicht auf seine Eigenschaften als sehr geeignet erwiesen:



ohne daß man aber darauf schwören könnte, daß die Anziehungskräfte der Atome gerade so und nicht anders verkoppelt sind. Je

komplizierter der Bau der Moleküle wird, um so zahlreicher werden ja auch die Erklärungsmöglichkeiten und wahrscheinlich auch die Kräftebeziehungen zwischen den vielen Atomen. Die bisherigen Formelbilder sind daher nur als ganz grobe, anschauliche Notbehelfe aufzufassen.

Die Geschichte wird aber noch viel komplizierter. Es finden sich nämlich Stoffe, die nicht nur dieselbe prozentuale Zusammensetzung und dasselbe Molekulargewicht besitzen, sondern ihrer ganzen chemischen Abstammung und ihrem Verhalten nach denselben Aufbau zu haben scheinen, und die trotzdem feine Unterschiede aufweisen, so daß man sie als verschieden betrachten muß. Diese Fälle sind sogar ziemlich häufig; so gibt es derartig verschiedene Milchsäuren, Weinsäuren, Zuckerarten, um nur einige Beispiele zu nennen. Die Verschiedenheit, um die es sich hier handelt, besteht hauptsächlich in dem Verhalten gegen polarisiertes Licht.

Was ist polarisiertes Licht? Zur Erklärung sei zunächst eine grobe Analogie gebracht. Man nehme zwei Bücher her und stelle sie so hintereinander auf, daß die Blattflächen in der gleichen Richtung verlaufen. Ein dünnes, langes Lineal, das man durch das erste Buch schiebt, geht dann auch leicht durch das zweite hindurch. Dreht man aber das zweite Buch quer, so geht das Lineal nicht mehr durch dieses hindurch.

Ebenso, wie sich das Lineal zu den Büchern verhält, verhält sich, so stellt man es sich vor, das polarisierte Licht zu bestimmten Stoffen.

Durch gewöhnliche Glasplatten geht das Licht ungehindert hindurch, so viele ich ihrer auch hintereinanderstellen mag. Schneidet man aber aus einem Turmalinkristall in der Richtung seiner Hauptachse zwei parallele Plättchen heraus, so ist das Licht, das durch das erste Plättchen hindurchgegangen ist, schon polarisiert. Es geht durch die zweite Platte zwar auch noch hindurch, wenn diese gleichgerichtet die erste bedeckt, nicht mehr jedoch, wenn sie quer zur ersten gedreht wird (siehe Abb. 20a und b).

Die überdeckte Stelle erscheint infolgedessen dunkel. Man stellt sich vor, daß durch die erste Platte nur Licht hindurchgeht, das eine ganz bestimmte, einseitige Schwingungsrichtung hat, etwa in der Ebene des Lineals in dem obigen anschaulichen Vergleich, und daß die Turmalinplättchen sich gegenüber diesem Lichtstrahl so verhalten wie die Bücher zu dem Lineal.

Bringt man nun zwiſchen die gekreuzten Turmalinplättchen die Löſung der Milchſäure, die aus dem Liebigſchen Fleiſchextrakt gewonnen werden kann, ſo wird das dunkle Feld etwas aufgehellt, und man muß die zweite Turmalinplatte in Stücke drehen, bis wieder Dunkelheit eintritt. Man nennt dieſe Milchſäure daher optiſch wirkſam, optiſch aktiv und ſagt, die Schwingungsebene des polariſierten Lichtes iſt in der Löſung gedreht worden. Und nun kommt der Unterſchied! Bei der eben genannten Milchſäure muß man die zweite Turmalinplatte etwas nach rechts, bei einer anderen dagegen, die beim Wachstum eines beſtimmten Pilzes (Bacillus acidi laevolactici) in Rohrzuckerlöſung entſteht, um ebenſoviel nach links drehen, um wieder größte Dunkelheit zu erhalten. Die eine Milchſäure iſt „rechtsdrehend", die andere „linksdrehend". Auch eine unwirkſame Milchſäure gibt es, deren Löſung das dunkle Feld der gekreuzten Turmalinplättchen nicht aufhellt; es iſt die Milchſäure, die ſich in der ſauren Milch, im Sauerkraut, in ſauren Gurken vorfindet. Sie erweiſt ſich bei näherer Unterſuchung als ein Gemiſch der beiden wirkſamen Formen; läßt man den Pilz Penicillium glaucum in der Löſung ihres Ammoniumſalzes wachſen, ſo wird die rechtsdrehende Säure verbraucht und die linksdrehende bleibt übrig. Mit Hilfe des Strychninſalzes gelingt ſogar eine Trennung der beiden Säuren. Dieſes Strychninſalz erhält man, wenn man eine Löſung der gewöhnlichen Milchſäure, z. B. aus ſaurer Milch, mit einer Löſung des als ſtarkes Gift bekannten Strychnins verſetzt. Beim Eindunſten dieſer Löſung kriſtalliſiert zuerſt das Strychninſalz der linksdrehenden Säure aus, und in der Löſung bleibt das der rechtsdrehenden Säure zurück.

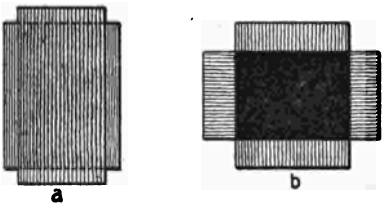
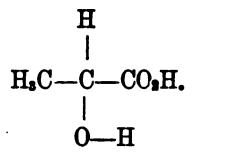


Abb. 20. Gleichgerichtete Turmalinplättchen (a) laſſen Licht hindurch, gekreuzte (b) nicht.

Das verſchiedene Verhalten der beiden Säuren gegen das polariſierte Licht deutet auf einen grundlegenden Unterſchied im Bau der Moleküle. Vermag die Atomtheorie ihn anzugeben? Van't Hoff und gleichzeitig Le Bel beſannen ſich auf eine noch unverwertete Möglichkeit für die Anordnung der Moleküle, nämlich ihre Verteilung im dreidimenſionalen Raum; bisher hatte man aus Bequemlichkeits-

gründen immer nur die Ebene des Papiers zur Veranschaulichung benutzt. Das Milchsäuremolekül ist folgendermaßen aufgebaut:



Diese Formel ist nach unseren Ausführungen wohl ohne weiteres verständlich. Stellen wir uns die Anordnung räumlich vor, und zwar um das mittelste Kohlenstoffatom gruppiert, so können wir perspektivische Bilder zeichnen, wie sie Abb. 21 zeigt.

Sie sehen einander zunächst völlig gleich, und sind doch nicht identisch. Man versuche einmal in Gedanken das rechte so in das linke zu schieben, daß nur gleiche Ecken aufeinanderfallen, und man wird zu seiner Überraschung merken, daß das nicht geht; das eine ist nämlich das Spiegelbild des andern, sie verhalten sich wie die linke Hand zur rechten. Der Grund hierfür liegt darin, daß alle vier Bindungsmöglichkeiten des mittelsten Kohlenstoffatoms ganz verschieden besetzt sind.*) Sind nur zwei von ihnen gleich besetzt, wie in der Propionsäure (Abb. 22), so ist die Seitenverkehrtheit nicht mehr vorhanden; es gibt daher auch nur eine Propionsäure.

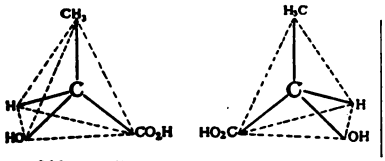


Abb. 21. Raumformel des Milchsäuremoleküls.

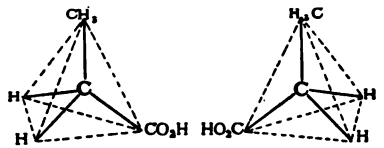


Abb. 22. Raumformel des Moleküls der Propionsäure.

Alle Stoffe, die ein vierfach verschieden beanspruchtes Kohlenstoffatom besitzen, treten auch in verschiedenen Formen auf, die polarisiertes Licht rechts bzw. links drehen. Was für komplizierte Verhältnisse sich einstellen, wenn in einem Molekül mehrere „asymmetrische" Kohlenstoffatome vorhanden sind, wie z. B. in vielen Zuckerarten, wo es gleich vier sind, mag sich jeder ausmalen. Erwähnenswert ist dabei übrigens, daß alle die verschiedenen Zucker-

*) Man nennt solch ein Kohlenstoffatom „asymmetrisch".

ſorten, die man ſich hiernach nur ausdenken kann, auch tatſächlich ſynthetiſch dargeſtellt und in ihrem räumlichen Aufbau genau erforſcht worden ſind, und zwar zum größten Teil von Emil Fiſcher.

Daß dieſe Spiegelbildähnlichkeit der Moleküle kein bloßes Gedankengebilde, ſondern vermutlich in Wirklichkeit vorhanden iſt, dafür ſprechen manche Kriſtallbildungen. Paſteur hatte z. B. ſchon vor der theoretiſchen Aufklärung dieſer Verhältniſſe beobachtet, daß die Kriſtalle des Natrium-Ammoniumſalzes der rechts- und der linksdrehenden Weinſäure ebenfalls in ſpiegelbildähnlichen Formen auftreten; Abb. 23 ſtellt dieſes Beiſpiel dar.

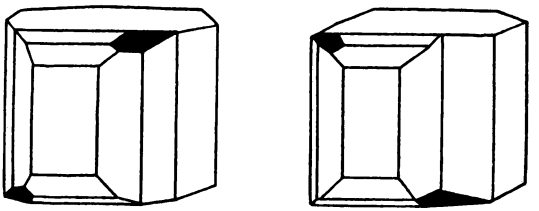


Abb. 23. Weinſäure-Kriſtalle.

So ruhen in der Atom- und Molekulartheorie noch viele Anpaſſungsmöglichkeiten, Fähigkeiten, die nur darauf warten, durch Verſuche und Beobachtungen ans Licht gebracht zu werden. Ihnen hier nachgehen, hieße ein Lehrbuch der Chemie ſchreiben. Die angeführten Beiſpiele waren nur ein paar charakteriſtiſche Proben.

III.

Unbekümmert um den Spott und die Begriffsklaubereien der Philosophen hat die Naturwissenschaft, zuerst angeregt durch die reine Philosophie, dann aber weiterhin selbständig ihre Atom- und Molekulartheorie aufgebaut, hat sich in ihr ein einfach gegliedertes Gerüst errichtet, an dem sie ihre reiche experimentelle Erfahrung übersichtlich ordnen kann. Wenn man zurückdenkt, wie die Vorstellungen des Molekulargewichts, des Atomgewichts, der Konstitutionsformeln bis in ihre räumliche Auslegung hinein geschaffen wurden, so findet man, daß sie anschauliche, leistungsfähige Vereinfachungen sind, Bilder, die nur das Wesentliche der überaus reichen, verwirrenden Tatsachenfülle festhalten. Sie haben die augenblicklich gültige Gestalt in einem langsamen Entwicklungsprozeß unter ständiger Anpassung an unseren wachsenden Erfahrungsschatz bekommen. Da ist es nicht weiter verwunderlich, würde ein Widerspruchsgeist und prinzipieller Zweifler sagen, wenn die Stoffe sich so verhalten, als ob derartige Moleküle und Atome existierten; wir haben sie ja zu dem Zwecke in unserer Phantasie zurechtgezimmert. Viele Generationen von Chemikern und Physikern haben ihre Beobachtungen in diese Symbole hineingeheimnist, haben diese Symbole der Erfahrung auf den Leib zugeschnitten, und jeder Chemiker lernt nun ihre reiche Bedeutung einfach auswendig; denn bequem sind sie, darüber herrscht kein Zweifel. Aber die Naturwissenschaft hat schon viele Hypothesen sterben sehen, vielleicht wird sie auch eines Tages ihre Atome und Moleküle zu Grabe tragen. Denn wenn man glauben soll, daß sie wirklich und leibhaftig existieren, so müßten dafür doch „handgreifliche" Beweise beigebracht werden.

Welch ein Triumph, wenn sich solche Nachweise wirklich auftreiben ließen! Dazu müßten wir uns für eine Reise in das Reich der

Zwerge rüsten, des Kleinsten, Winzigsten, was sich überhaupt nachweisen, wägen, sichtbar machen läßt; denn nun käme es darauf an, dem einzelnen Molekül und Atom auf den Leib zu rücken.

Wie weit gelangen wir wohl in dieser Richtung mit all unserer Kunst? Welches sind die geringsten, noch erkennbaren Mengen eines Stoffes?

Wenden wir uns zuerst an die Chemiker, die ja sehr feine Methoden zum chemischen Nachweis von Stoffen haben. Sie weisen z. B. die Anwesenheit eines Magnesiumsalzes in einer Lösung dadurch nach, daß sie zu dieser Ammoniak und Natriumphosphatlösung zugeben. Es bildet sich durch wechselseitige Umsetzung das in Wasser außerordentlich schwer lösliche Magnesium-Ammoniumphosphat, das auskristallisiert. Dieser Niederschlag ist so charakteristisch, daß an ihm unter dem Mikroskop noch die Anwesenheit von 0,000 000 02 g Magnesium erkannt werden kann. An derartig viele Nullen hinter dem Komma werden wir uns nun rasch gewöhnen müssen. Vorstellen kann man sich derartige Kleinheiten — wir kommen noch weiter herunter, — schwer. Es kommt schließlich nur noch darauf an, die Nullen hinter dem Komma zu zählen, und dazu schreiben wir die obige Zahl praktischer 2×10^{-8}, wobei die Zahl 10^{-8} angibt, daß die 2 in der achten Stelle hinter dem Komma steht. Es kommt gleich noch besser.

Die Anwesenheit von Säuren und Alkalien untersucht man mit rotem und blauem Lackmuspapier (s. S. 33). Emich färbte Seide mit Lackmusfarbstoff, um durch ein einzelnes gefärbtes Seidenfädchen bei Betrachtung unter dem Mikroskop ein Prüfungsmittel für ungewöhnlich geringe Säure- und Alkalimengen zu erhalten. Um die Grenze festzustellen, bis zu der diese Methode leistungsfähig ist, verdünnte er Natronlauge fortgesetzt mit reinstem Wasser und prüfte einen ganz kleinen Tropfen unter dem Mikroskop mit einem roten Faden der Lackmusseide. Er konnte auf diese Weise noch 3×10^{-10} g Ätznatron erkennen und mit einem blauen Fädchen 2×10^{-9} g Schwefelsäure.

Dieses unglaublich feine stoffliche Unterscheidungsvermögen ist aber keine Kunst, die etwa der Chemiker erfunden hat. Man denke nur an die feine Spürnase eines Polizeihundes! Ich weiß nicht, ob schon jemals die untere Grenze für die Reaktionsfähigkeit solch einer Hundenase festgestellt worden ist. Das wäre jedenfalls sehr interes-

sant. Unserer Nase muß man im Verhältnis dazu schon recht deutlich werden, wenn sie etwas merken soll; für ganz starke Gerüche geht ihr Auffassungsvermögen aber doch recht weit. Emil Fischer und Penzoldt machten folgende bemerkenswerte Versuche. Einer von ihnen verstäubte in einem geeigneten, leeren Zimmer geringe Mengen stark riechender Stoffe und mischte die Luft durch Wehen mit

Abb. 24. Seifenblasen.
(Nach einer Originalzeichnung von C. Schmauck.)

einer Fahne gut durch. Dann kam der andere herein, um festzustellen, ob und wonach es rieche. Wenn er einen Geruch gerade noch richtig wahrnahm, so konnte man aus der Größe des Zimmers, der darin verstäubten Substanzmenge und dem Hohlraum der Nase, dessen Gehalt an riechender Substanz allein für die Wahrnehmung in Frage kommt, die unterste Grenze des Wahrnehmbaren ausrechnen. Es stellte sich heraus, daß von der äußerst unangenehm riechenden Substanz Mercaptan noch $2{,}2 \cdot 10^{-12}$ g gerochen werden konnten.

Ähnlich groß ist die Empfindlichkeit gewisser Bakterien, winziger, einzelliger Lebewesen, gegenüber Sauerstoff. Steht ihnen in dem Wassertropfen, den sie bevölkern, Sauerstoff zur Verfügung, so sind sie in lebhafter Bewegung. Geht der Sauerstoff aus, so hört die Bewegung auf. Eine noch so winzige Luftblase aber macht sie wieder munter. Prof. Engelmann, der sie beobachtete, berechnete aus der Größe der Luftblase und dem bekannten Gehalt der Luft an Sauerstoff, daß die Bakterien auf weit weniger als $1 \cdot 10^{-11}$ g Sauerstoff ansprechen und diese winzige Menge desselben also nachweisen.

Übrigens kann man auch durch direkte Wägung noch sehr geringe Substanzmengen feststellen. Man hat für gewisse wissenschaftliche Zwecke, z. B. zur Messung der Gewichtsveränderungen radioaktiver Stoffe, außerordentlich empfindliche Wagen, sog. Mikrowagen, konstruiert, mit denen noch Gewichtsunterschiede von $4 \cdot 10^{-9}$ g (das sind also vier Millionstel Milligramm) zu ermitteln sind.

Goldschläger vermögen Gold so dünn auszuhämmern, daß es grün durchscheinend wird und eine Dicke von ungefähr $^1/_{10000}$ mm hat. Wie man solche geringe Dicke mißt? Das ist in diesem Falle leicht. Ein kleiner Goldwürfel von der Größe eines Kubikmillimeters wird zu einer zusammenhängenden Metallhaut von 10 000 qmm Oberfläche auseinandergetrieben. Der Rauminhalt bleibt gleich, 1 cbmm, also muß die Dicke der Haut $= {}^1/_{10000}$ mm betragen. Ein würfelförmiges Goldteilchen von dieser Kantenlänge würde $2 \cdot 10^{-14}$ g wiegen.

Man kann aber noch dünnere Häute herstellen. Mancher hat vielleicht schon an Seifenblasen, kurz bevor sie platzen, schwarze Flecken auftreten sehen. Das sind scheinbar die dünnsten Stellen, die uns hier natürlich besonders interessieren. Um ihre Dicke zu messen, müßten sie von etwas längerer Dauer sein. Diese kann man erzielen, wenn man derartige dünne Flüssigkeitshäute unter einer Glasglocke in einer mit Wasserdampf gesättigten Atmosphäre erzeugt, und zwar zwischen dünnen Drahtbügeln, wie sie die Abb. 18 zeigt. Spannt man in ihnen die Flüssigkeitshaut bis zum Auftreten der schwarzen Flecken, so meint man zunächst, es wären Löcher, bis man sieht, daß sich helle Gegenstände in ihnen spiegeln. Bei weiterem Ausziehen treten in ihnen noch dunklere Flecke auf, die noch dünner sind. Sie sind in der dampfgesättigten Atmosphäre beliebig lange haltbar, und man kann sie mit Muße studieren. Sie sind

an und für sich unsichtbar und verraten ihr Vorhandensein nur dadurch, daß sie sehr hell leuchtende Gegenstände, wie z. B. die Sonne, schwach widerspiegeln. Ihre Dicke zu messen, ist nicht gerade leicht. Man kann es z. B. so machen, daß man ihrer viele hintereinanderstellt und dann mißt, welche Verzögerung ein Lichtstrahl erfährt, wenn er durch sie hindurchmuß. (Durch Wasser geht das Licht bekanntlich langsamer wie durch Luft.) Vergleicht man dann, wie dick die Schicht einer zusammenhängenden Seifenlösung ist, in der der Lichtstrahl dieselbe Verzögerung erleidet, und teilt diese Dicke durch die Anzahl der Häutchen, so hat man deren Feinheit. Sie betrug an den dünnsten Stellen $6 \cdot 10^{-7}$ cm.

Eine noch dünnere Haut kann man auf viel einfachere Weise aus Öl auf Wasser erzeugen. Bringt man einen Tropfen Öl, z. B. Olivenöl, auf Wasser, so breitet er sich rasch über dessen ganze Oberfläche aus. Durch Verkleinerung des Tropfens und Vergrößerung der Wasseroberfläche wird die Ölhaut immer dünner, so dünn, daß sie gar nicht mehr gesehen werden kann. Ihr Vorhandensein läßt sich aber auf andere Art sicher nachweisen. Wirft man ein Stückchen Kampfer auf reines Wasser, so fährt es auf der Oberfläche unruhig hin und her.*) Gibt man aber zuerst einen Tropfen Öl auf das Wasser und wirft dann das Kampferstückchen darauf, so bewegt es sich nicht mehr, auch wenn die Ölhaut nicht zu sehen ist. Geht man bei neuen Versuchen mit der Menge des Öles immer mehr herunter, so erreicht man schließlich einen Grenzzustand, bei dem die Kampferstückchen sich wieder zu bewegen beginnen, ein Zeichen, daß die Ölhaut scheinbar nicht mehr vollständig zusammenhängt. An dieser Grenze hat sie eine Dicke von 0,000 000 2 cm (2×10^{-7}).**) Ein Ölteilchen, das einen Würfel von dieser Kantenlänge ausfüllt, würde weniger als 8×10^{-21} g wiegen. Würde man dann annehmen, daß die Haut aus einer doppelten Molekülage bestehe, so würden in diesem Öltropfen acht Moleküle enthalten sein, und ein Molekül Olivenöl könnte höchstens $1 \cdot 10^{-21}$ g wiegen. Das Molekulargewicht des Olivenöls beträgt 884; das Atomgewicht des Wasserstoffs ist 1.

*) Dies kommt daher, daß an den Stellen des Wassers, an denen sich der Kampfer löst, die Oberflächenspannung des Wassers bedeutend herabgesetzt wird, so daß sich um den Kampfer herum Spannungsunterschiede ausbilden, die, selbst rasch wechselnd, ihn hin und her zerren.

**) Die Zahl kann aus der Ölmenge und der Größe der Wasseroberfläche leicht berechnet werden.

Wir könnten also sogar das absolute Gewicht eines Wasserstoffatoms schätzen und es ungefähr tausendmal so leicht annehmen wie das Gewicht, das auf das Ölmolekül kam. Ein Wasserstoffatom würde dann 1×10^{-24} g wiegen.

Als sehr empfindlich galt früher der Nachweis mancher Elemente durch die Flammenfärbung. Bringt man bei Dunkelheit Kochsalz oder besser noch Soda in eine farblose Spiritus- oder Gasflamme, so erstrahlt sie in intensiv gelbem Licht, alle Umstehenden mit Leichenfarbe anhauchend. Diese gelbe Farbe ist durch das Natrium in dem Salz verursacht und für dieses Element charakteristisch. Unter geeigneten Bedingungen kann man an dieser Flammenfärbung noch $7 \cdot 10^{-10}$ g Natrium erkennen. Das ist nach den Zahlen, die wir schon gesehen haben, nicht viel. Da ist der Nachweis mancher organischen Farbstoffe, die sich wie das Fluoreszëin durch besonders starke Fluoreszenz auszeichnen, viel genauer. Die verdünnte wäßrige Lösung seines Natriumsalzes sieht in der Durchsicht, im durchscheinenden Licht, gelbrot aus, in der Aufsicht aber, also im reflektierten Licht, lebhaft grün. Dieses grüne Leuchten ist die Fluoreszenzfarbe. Sie ist auch bei außerordentlich starker Verdünnung noch wahrnehmbar. Um die kleinsten Mengen Fluoreszëin festzustellen, die man durch die Fluoreszenz noch erkennen kann, verfährt man folgendermaßen. Man betrachtet unter dem Mikroskop bei starker Vergrößerung einen Tropfen der Lösung, indem man ihn mit einem quer (senkrecht) zur Beobachtungsrichtung einfallenden, intensiven Lichtstrahl beleuchtet. Dann gelangt kein direktes, sondern nur das grüne Fluoreszenzlicht in das Auge. Nun verdünnt man die Lösung, aus der man die Tropfen nimmt, immer mehr, so lange, bis die grüne Farbe gerade noch wahrnehmbar ist. Dies tritt ein, wenn 1 g Fluoreszëin in 1000 l Wasser gelöst ist. Der Farbstoff, der in dem zur Beobachtung verwandten kleinen Tropfen enthalten ist, beträgt dann den millionsten Teil des Tropfengewichts, wiegt also 1×10^{-18} g.

Was bei dem letzten Versuch beobachtet worden ist, ist nur die Fluoreszenz der Lösung. Die Lösung selbst erscheint vollständig klar und durchsichtig. Unendlich weit sind wir in dem Nachweis geringer Substanzmengen gelangt, aber einen Beweis für die Existenz von Molekülen haben wir nicht gefunden. Nichts deutet auf das Vorhandensein kleiner, für sich bestehender Teile. Das Fluoreszëinmolekül selbst z. B. haben wir nicht sehen können. Nun

könnte jemand den Vorschlag machen, die Vergrößerung des Mikroskops einfach so lange zu erhöhen, bis derartig kleine Teilchen sichtbar werden, — wenn sie wirklich vorhanden sein sollten.

Als ob das so ohne weiteres ginge! Alles hat seine natürlichen Grenzen. Für meine Augen ist das Blatt Papier eine einheitliche glatte Fläche, unter dem Mikroskop wird es zu einem Filz von feinen Fäserchen aufgelöst. Ein aus einem Wassergraben entnommener Wassertropfen erscheint unserem Auge klar und rein; unter dem Mikroskop aber enthüllt sich in ihm eine ungeahnte Kleinwelt von Lebewesen. Die untere Grenze für das Auflösungsvermögen unseres Auges gegenüber punktförmig kleinen Gebilden ist durch seinen anatomischen Bau bedingt. Zwei Punkte, deren Abbilder auf der hinteren Augenwand zu nahe aneinanderfallen, werden nur noch als eine Erscheinung wahrgenommen. Das Mikroskop rückt diese Punkte für unser Auge weiter auseinander. Aber auch das Mikroskop hat eine Grenze seiner Leistungsfähigkeit. Sie kennen zu lernen, ist für uns natürlich außerordentlich wichtig, da wir vor der Frage stehen, ob man nicht durch geeignete Verbesserung des Apparats doch noch wirkliche Moleküle sichtbar machen könnte, um unsere Entdeckungsfahrt zum glücklichen Abschluß zu bringen. Dazu müssen wir einige orientierende Versuche machen, denn in der Natur-

Abb. 25 zeigt das Bild eines Lichtstrahls, der durch zwei enge Spalte auf eine Wand geworfen wird.

wissenschaft muß alle Erkenntnis durch praktische Arbeit erkauft werden.

Wir lassen in einen dunklen Versuchsraum durch einen schmalen Spalt von etwa 1 mm Breite einen Lichtstreifen hineinfallen. Mit ihm beleuchten wir einen gleichgerichteten zweiten Spalt, dessen Breite verstellbar ist, so daß auf einem Schirm hinter ihm ein helles, scharfes Abbild von ihm entsteht (s. Abb. 25). Jetzt machen wir ihn enger und enger. Da treten allmählich merkwürdige Veränderungen in dem Bild auf. Zuerst wird es von dunklen Linien durchzogen; dann, — wir verengern den beleuchteten Spalt immer mehr, — werden die Ränder des Abbilds undeutlich; dafür tauchen auf beiden Seiten desselben neue helle, aber farbige Streifen auf (sie werden Beugungsbilder des Spaltes, auch Interferenzstreifen genannt); diese rücken immer weiter nach außen und verschwinden schließlich ganz, während das ursprüngliche Abbild immer breiter und verschwommener geworden ist, und schließlich nur ein unbestimmter Lichtschein übrig bleibt. Der Spalt selbst ist also nicht mehr zu sehen, sondern nur ein diffuser Lichtschein. Der Spalt ist jetzt nur noch wenige tausendstel Millimeter breit. Wollten wir ihn im Mikroskop beobachten, so würde auch dieses nur den undeutlichen Lichtschein fassen, aber kein Bild des Spaltes mehr geben können. Und wenn wir zwei oder viele derartige Spalte so nebeneinanderlegen würden, daß ihre Abstände nicht breiter sind wie die Spalte selbst, so würden sich die Lichterscheinungen überdecken. Es würden weder Spalten noch Trennungsstriche zu sehen sein, es würde nur eine allgemeine Helligkeit herrschen, als ob dem Lichtstrahl nichts im Wege stände. Das Mikroskop ist hier ohnmächtig; wir stehen vor der Grenze seiner Leistungsfähigkeit. Sie liegt begründet in der Natur des Lichtes, das bei ganz engen Zwischenräumen, wie sie bei den Molekülen auch vorliegen müssen, nicht mehr geradeaus geht, sondern um die Ecke, so daß ein deutliches Licht- oder Schattenbild eines derartig kleinen Gegenstandes eben nicht mehr zu fassen ist, da es nicht vorhanden ist.

Messen wir die Breite des schmalen Spaltes, der gerade noch ein einigermaßen deutliches Abbild liefert, so finden wir, daß er ungefähr $^1/_{4000}$ mm (0,00025 mm) breit ist. Nun wissen wir aber andererseits, daß das Licht sich so verhält, als ob senkrecht zum Gang des Lichtstrahls eine wellenartige Bewegung stattfände; wir mach-

ten diese Annahme schon für das polarisierte Licht. Man denke, um sich ein grobes Bild des Vorganges zu machen, an die Wellen, die ein ins Wasser geworfener Stein erregt. Während die Wellenbewegung fortschreitet, steigt und fällt senkrecht zu ihr das Wasser regelmäßig. Die Länge der Lichtwellen kann man leicht messen; sie ist außerordentlich klein und für die verschiedenen Farben verschieden; die kleinsten Wellen hat das violette Licht, sie sind 0,0003 mm, die des roten dagegen bis 0,0008 mm lang. Ein Vergleich der Lichtwellenlänge mit den Zahlen für die unterste abbildbare Spaltbreite enthüllt uns auf einmal das ganze Rätsel: die Lichtwellenlänge selbst ist es, die uns ein Eindringen in die Welt der Moleküle versperrt. Der Abstand zweier Striche darf nicht kleiner als eine halbe Wellenlänge des Lichtes sein, sonst sind sie nicht mehr wahrzunehmen. Würden wir Licht von noch kleinerer Wellenlänge haben, so würden wir auch noch kleinere Gegenstände auseinanderhalten können. Das geht tatsächlich. Hinter den Wellen des violetten Lichtes kommen noch Lichtwellen, die zwar unsere Augen nicht mehr wahrnehmen, die wir aber durch die photographische Platte nachweisen können. Man hat daraufhin besondere Apparate gebaut, mit deren Hilfe man mit unsichtbaren Strahlen von 0,000275 mm Wellenlänge noch Körperchen photographieren und durch Vergrößerung sichtbar machen kann, die einen Durchmesser von nur 0,000 12 mm haben. Mit diesem Hilfsmittel hat man sogar noch organisierte Körperchen photographieren können, Sporen, die für das gewöhnliche Mikroskop nicht mehr sichtbar sind. Und nun bedenke man, daß eine solche Spore doch eine sehr komplizierte Organisation besitzt, da sich aus ihr wieder

Abb. 26. Richard Zsigmondy.

ein neues Lebewesen entwickeln kann! Also die Welt der Moleküle liegt weit, schier unerreichbar weit darunter.

Aber man soll sich hüten, bei solchen Gelegenheiten von letzten Grenzen der Erkenntnis zu sprechen. Erreicht die Hauptstraße ein Ende, so findet sich vielleicht dicht dabei ein Fußpfad, der noch weiter führt. Auch in diesem Falle wurde ein solcher Pfad gefunden; der ihn entdeckt hat, heißt Zsigmondy, dessen Bild Abb. 26 zeigt. Es ist wie mit dem Ei des Kolumbus: nachher sieht die Lösung der Aufgabe sehr einfach aus; das Schwierige ist nur, daß sie überhaupt gefunden wird, daß jemand auf den glücklichen Einfall kommt.

Um diesen Einfall richtig begreifen zu können, brauchen wir wieder eine kleine Vorgeschichte. Wir können den Weg eines Lichtstrahls, der durch ganz reine, von Stäubchen freie Luft, oder durch eine ganz reine, klare Flüssigkeit, z. B. durch destilliertes Wasser, geht, nicht erkennen. Sowie aber kleine Partikelchen, Staubkörnchen, Nebeltröpfchen in der Luft oder feine Trübungen in dem Wasser schweben, leuchten sie in dem Strahl hell auf und verraten ihn auch einem seitlich stehenden Beobachter. Man braucht nur an den Lichtkegel zu denken, der von einem Kinematographen ausgeht (heutzutage sicher der volkstümlichste Vergleich), oder an die Lichtbündel, die sich des Nachts von den Straßenlaternen in dichten Nebel hinein verlieren! Will man Flüssigkeiten daraufhin untersuchen, ob sie vollkommen klar und frei von feinen, schwebenden Körperchen sind, so schickt man einen möglichst starken Lichtstrahl hindurch und sieht zu, ob er von der Seite zu erkennen ist; das ist eine wissenschaftlich viel gebrauchte Prüfungsmethode. An diesem, von kleinen Stäubchen abgebeugten, zerstreuten Licht, hat man noch eine interessante Beobachtung gemacht: es ist polarisiert, d. h. es wird von einem Turmalinplättchen bei einer bestimmten Stellung nicht hindurchgelassen (s. S. 47/48). Diese Polarisation des seitlich zerstreuten Lichtes können wir wiederum da, wo auf anderem Wege keine Teilchen nachzuweisen sind, als Beweis dafür ansehen, daß es von kleinen Teilchen abgebeugt worden ist.

Zsigmondy arbeitete mit ganz feinem, in Wasser schwebendem Goldstaub, der oft so fein war, daß man schon von einer Goldlösung sprechen konnte. Diese feine Verteilung kann auf folgende Weise erreicht werden. Wenn man eine stark verdünnte, wäßrige Lösung von Goldchlorid (das Wasser muß für diese Zwecke ganz be-

sonders gereinigt werden), mit Formaldehyd oder noch besser mit einer ätherischen Lösung von Phosphor versetzt, so tritt ein chemischer Vorgang ein, den man Reduktion nennt, und bei dem sich metallisches Gold bildet. Dies macht sich oft dadurch bemerkbar, besonders bei größeren Konzentrationen oder unreinem Wasser, daß die Flüssigkeit sich unter starker Trübung mit violettroten bis blauvioletten Goldteilchen füllt, die sich langsam zu Boden setzen. Bei reinstem Wasser, großer Verdünnung und vorsichtigem Arbeiten entsteht eine

Abb. 27. Die Arbeit am Ultramikroskop.
(Nach einer Originalzeichnung von C. Schmauck.)

rote, ganz klare Flüssigkeit. Zsigmondy konnte sie bis zu einem Goldgehalt von 0,12% anreichern, ohne daß eine Veränderung eintrat. In was für einem Zustand befand sich das in Wasser doch sonst ganz unlösliche Gold in dieser klaren Flüssigkeit? Daß es sich um metallisches Gold handelte, erkannte man, wenn man zur Lösung nur etwas Kochsalz gab. Sofort schlug die Farbe nach Blau um, es bildeten sich Flocken, die sich zusammenballten und absetzten. Eine Untersuchung erwies, daß der Niederschlag reines Gold war.

Ließ Zsigmondy durch die klarsten Lösungen, die er erhielt, einen hellen Lichtstrahl hindurchgehen, so machte sich kaum eine Zerstreuung des Lichtes bemerkbar. — Jetzt kommt die Schürzung des Knotens! — Manchmal aber entstanden bei gleichen Arbeitsbedingungen auch mehr oder minder stark getrübte rote Flüssigkeiten,

in denen ein hindurchgehender Lichtstrahl vorzüglich zu sehen war, während das abgebeugte Licht sich zugleich als polarisiert erwies, so daß kein Zweifel über die feine, stäubchenartige Verteilung des Goldes vorhanden sein konnte. Diese Flüssigkeit konnte Zsigmondy bis auf das Tausendfache verdünnen, ohne daß die Sichtbarkeit des Lichtstrahls merklich abnahm.

Befand sich das Gold in der ganz klaren Lösung in einem anderen Zustand als in der trüben, war es wirklich gelöst, und rührte die schwach sichtbare Abbeugung nur von wenigen Einzelteilchen her? Das war eine schwierige und für das ganze Atomproblem sehr interessante Frage. Denn in demselben Zustand wie die klare Goldlösung mußte sich auch eine Zucker- oder Eiweißlösung befinden, die sich genau ebenso verhalten. Zsigmondy neigte zu der oben angedeuteten Ansicht, daß die schwache Abbeugung des Lichtes von wenigen Einzelteilchen herrührte und das übrige Gold tatsächlich gelöst war; er entschloß sich aber doch zu einer Prüfung. Er sagte sich: Wenn man durch eine stark verdünnte, trübe, rote Goldlösung einen hellen Lichtstrahl schickt, und die in ihm sichtbare Trübung unter dem Mikroskop senkrecht zu seinem Verlauf beobachtet, so müssen sich die einzelnen größeren Teilchen als leuchtende Stäubchen vom dunklen Hintergrunde abheben, wenn sie nur weit genug voneinander entfernt sind. Ihre Gestalt braucht ja nicht erkennbar zu sein, wenn man nur den Kreis des zerstreuten Lichtes sieht. Er machte den Versuch, dessen erste, einfache Anordnung Abb. 27 ohne weitere Erklärung genügend erläutert. Was er fand, hat er selbst folgendermaßen erzählt: „Tatsächlich konnte ich in zwei stark ge-

Abb. 28. H. Siedentopf.

trübten Flüssigkeiten bei Sonnenlicht unter Anwendung einer etwa hundertfachen Vergrößerung die Anwesenheit von Tausenden glänzender Goldteilchen nachweisen, deren Größe, wie eine Überschlagsrechnung aus den Teilchenabständen und der vorhandenen Goldmenge ergab, kleiner als die Wellenlänge des Lichtes sein mußte. Bei gewöhnlicher Beleuchtung waren sie selbst mit den besten Objektiven nicht wahrnehmbar!"

Triumph! Eine bisher verschlossene Pforte zu einer für unsere Sinne bisher unzugänglichen Welt war geöffnet! Man sollte noch

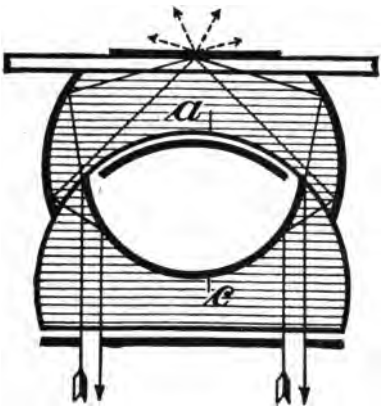


Abb. 29. Kardioidkondensator der Firma Zeiß.

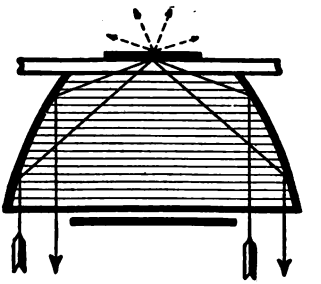


Abb. 30. Paraboloidkondensator der Firma Zeiß.

mancherlei Interessantes zu sehen bekommen; es kam nur darauf an, die Apparatur für diese Beobachtungen möglichst vollkommen auszubilden. Hierzu verband sich Zsigmondy mit Siedentopf (siehe Abb. 28), der nun das „Ultramikroskop", so wurde das den neuen Zwecken angepaßte Mikroskop getauft, zu höchster technischer Vollkommenheit entwickelte.

Es ist sicher von Interesse, ganz kurz einige wichtige Gesichtspunkte darzulegen, die dabei berücksichtigt werden mußten. Einmal kam es darauf an, direktes Licht, in dem die leuchtenden Pünktchen natürlich untergehen würden, vom Auge des Beobachters fernzuhalten. Das konnte auf mancherlei Weise geschehen; entweder durch seitliche Beleuchtung, senkrecht zur Beobachtungsrichtung wie in Abbildung 27, oder, bei Beleuchtung in der Beobachtungsrichtung, durch Abblendung schädlicher Strahlen. Diese Auslese bewirkt eine ge-

eignete, unter dem Präparat angebrachte Vorrichtung. Die Abb. 29 und 30 zeigen zwei gebräuchliche Ausführungen, den Paraboloid- und den Kardioidkondensator von Zeiß. Die unten in der Mitte gezeichnete Blende hält alle unbrauchbaren Strahlen zurück. Den Gang der zur Beleuchtung brauchbaren Randstrahlen zeigen die Pfeile. Sie deuten an, daß die beleuchtenden Strahlen am Deckgläschen vollständig zurückgeworfen werden. So erhält man einen dunklen Hintergrund, und in das Mikroskop und das Auge gelangt nur das von den Teilchen abgebeugte Licht, das in den Abbildungen durch punktierte Pfeile angedeutet ist. Der Kardioidkondensator ist besonders lichtstark und daher in allen Fällen von großem Vorteil, in denen besonders kleine Teilchen sichtbar gemacht werden sollen; denn die Helligkeit der Teilchen sinkt unvergleichlich viel rascher als ihr Durchmesser, so daß auf diese Weise bald wieder eine untere Grenze für die Sichtbarmachung erreicht ist. Diese Sichtbarmachung hängt nur von der Intensität der Lichtquelle ab. Bei der stärksten Beleuchtung, d. i. mit grellstem Sonnenlicht, konnte Zsigmondy noch Goldteilchen wahrnehmen, die einen Durchmesser von 0,000 0005 cm hatten; sie stellen wohl die unterste Grenze der im Ultramikroskop erkennbaren Körperchen dar.

Wie man den Durchmesser und wohl auch das Gewicht so kleiner Körperchen feststellen kann? Einfach und leicht ist das nicht. Wenn man in einer bestimmten Menge Lösungsmittel eine bestimmte Menge Goldchlorid löst und reduziert (siehe S. 61), so kennt man zunächst die in der Lösung enthaltene Gewichtsmenge Gold und kann auch den Raum ausrechnen, den es als kompakte Masse einnehmen würde. Nun zählt man unter dem Ultramikroskop die Anzahl der Teilchen in einem ganz kleinen Raumteil aus und berechnet daraus die Anzahl der Teilchen in der ganzen Lösung. Sehr genau ist diese Methode zwar nicht, aber das Mittel aus sehr vielen Beobachtungen gestattet doch, ungefähr zu wissen, auf wieviel Teilchen sich die ganze Goldmenge verteilt hat. Daraus lassen sich dann Gewicht und Durchmesser des einzelnen Teilchens berechnen. Das Gewicht des kleinsten sichtbaren Teilchens dürfte ungefähr $2{,}5 \cdot 10^{-18}$ g betragen.

Die folgende Tabelle faßt die bisher angeführten Zahlen für die nach verschiedenen Methoden beobachtete feinste Verteilung des Stoffes zusammen:

Chemischer Nachweis des Magnesiums	0,000 000 02	$g = 2 \cdot 10^{-8}$ g
Mikrowage	0,000 000 004	$g = 4 \cdot 10^{-9}$ g
Ätznatron durch Lackmusseide	0,000 000 000 3	$g = 3 \cdot 10^{-10}$ g
Natrium d. Flammenfärbung	0,000 000 000 7	$g = 7 \cdot 10^{-10}$ g
Sauerstoff durch Bakterien	0,000 000 000 01	$g = 1 \cdot 10^{-11}$ g
Merkaptan durch Geruch	0,000 000 000 002 2	$g = 2{,}2 \cdot 10^{-12}$ g
Dicke der ausgehämmerten Goldhaut	0,000 01	$cm = 1 \cdot 10^{-5}$ cm
Gewicht eines entsprechenden Goldwürfels	0,000 000 000 000 02	$g = 2 \cdot 10^{-14}$ g
Goldteilchen im Ultramikroskop sichtbar	0,000 000 5	$cm = 5 \cdot 10^{-7}$ cm
Gewicht desselben	0,000 000 000 000 000 002 5	$g = 2{,}5 \cdot 10^{-18}$ g
Fluoreszëin in Lösung	0,000 000 000 000 000 001	$g = 1 \cdot 10^{-18}$ g
Dicke einer Wasserhaut	0,000 000 6	$cm = 6 \cdot 10^{-7}$ cm
Gewicht eines entsprechenden Würfels	0,000 000 000 000 000 000 216	$g = 2{,}16 \cdot 10^{-19}$ g
Ölhaut auf Wasser, Dicke	0,000 000 2	$cm = 2 \cdot 10^{-7}$ cm
Gewicht eines entsprechenden Würfels	0,000 000 000 000 000 000 008	$g = 8 \cdot 10^{-21}$ g

Doch wir haben ganz das Problem aus den Augen verloren, bei dessen Verfolgung Zsigmondy das Reich der ultramikroskopisch kleinen Teilchen erschloß. In welchem Zustand befindet sich nun das Gold in den ganz klaren roten Lösungen? Unter dem Ultramikroskop ist kaum die Andeutung des quer hindurchgehenden Lichtstrahls zu sehen. Gibt man ein Salz, z. B. Salpeter, zu der Lösung hinzu, so beobachtet man, wenn die Erscheinungen nicht zu rasch verlaufen, im Ultramikroskop zunächst das Auftreten eines deutlichen Lichtkegels. Es erscheinen dann wogende, gelbe Nebelballen, in denen auf einmal helle Einzelteilchen aufleuchten, sich rasch vermehren, vergrößern und sich zu ganz großen zusammenlagern. Der ganze Vorgang ist ein Zeichen dafür, daß in den klarsten Lösungen das Gold besonders fein verteilt ist. Ein anderer Beweis ist auch der: Versetzt man eine Goldchloridlösung, die sonst zu der ganz klaren, roten Goldlösung führen würde, mit einigen Tropfen einer solchen vorher bereiteten, und reduziert dann, so erhält man sofort eine schwach trübe Lösung. Benutzt man diese wieder zum „Impfen" eines neuen Versuchs, so erhält man

schon eine Lösung, deren Teilchen im Ultramikroskop zu sehen sind. Es haben also in dieser Versuchsfolge die unsichtbaren Teilchen immer als Keime zu größeren gedient.

Diese Versuche zeigen, daß eine scharfe Grenze zwischen wirklichen Lösungen, z. B. der des Goldchlorids, und der staubförmigen Verteilung im Ultramikroskop sichtbarer Teilchen, — man nennt sie Suspension, — nicht zu ziehen ist. Beide unterscheiden sich nur in der Größe ihrer Teilchen. Lösungen, die infolge der Größe ihrer Teilchen einen Übergang zu den groben Suspensionen bilden, nennt man kolloidale Lösungen. Sie sind nicht nur von Gold, sondern auch von vielen anderen Metallen und Stoffen hergestellt worden und in der Natur weit verbreitet. Wesentliche Unterschiede gegenüber den Lösungen von Salzen und anderen Stoffen haben sich auch bei genauerem Studium ihrer sonstigen Eigenschaften nicht ergeben. Damit stehen wir vor dem lange erstrebten Ziel, wir werden zu dem Schlusse gezwungen, daß tatsächlich alle Stoffe aus getrennten Teilchen, aus Molekülen und Atomen bestehen.

Als gewichtigen Zeugen können wir selbst unser blaues Himmelslicht heranziehen. Das mag auf den ersten Blick verwunderlich erscheinen, ist aber wirklich so. Abgebeugtes Licht wird ja mit der abnehmenden Größe der kleinsten Teilchen sehr rasch so schwach, daß man auch seine Polarisation nicht gut mehr beobachten kann. Ausgleichend kann hier nur eine genügend dicke Schicht der — Moleküle wirken, wie sie z. B. in unserer Atmosphäre vorhanden ist. Nun ist unser blaues Himmelslicht weiter nichts wie zerstreutes, abgebeugtes Sonnenlicht, das wir gegen den absolut dunklen Weltenraum beobachten. Untersuchen wir es in senkrechter Richtung zu den Sonnenstrahlen, so erweist es sich tatsächlich als polarisiert, und hieran können nur die Luftmoleküle schuld sein, deren Vorhandensein wir also annehmen müssen.

Erklärung zu Abbildung 31.

Abbildung 31 gibt in 10000facher linearer Vergrößerung einen anschaulichen Vergleich der Größenverhältnisse verschiedener mikroskopischer und ultramikroskopischer Teilchen. (Nach Zsigmondy, zur Erkenntnis der Kolloide.)

A Blutkörperchen im Blute des Menschen (Durchmesser 0,000 75 cm). B Bruchstücke von Reisstärkekörnern (Durchmesser 0,0003—0,000 8 cm). C Teilchen einer sehr feinen Tonaufschlemmung in Wasser. E Milchbrandbazillen (Breite 0,000 1 cm). F Kugelbakterien (Durchmesser 0,0001 bis 0,000 05 cm). f, g, h im Ultramikroskop sichtbare Teilchen einer kolloidalen Goldlösung (Durchmesser 0,000 000 6 cm bis 0,000 001 5 cm). i, k, l größere Goldteilchen, die sich absetzen (Durchmesser 0,000 0075 cm bis 0,000 02 cm).

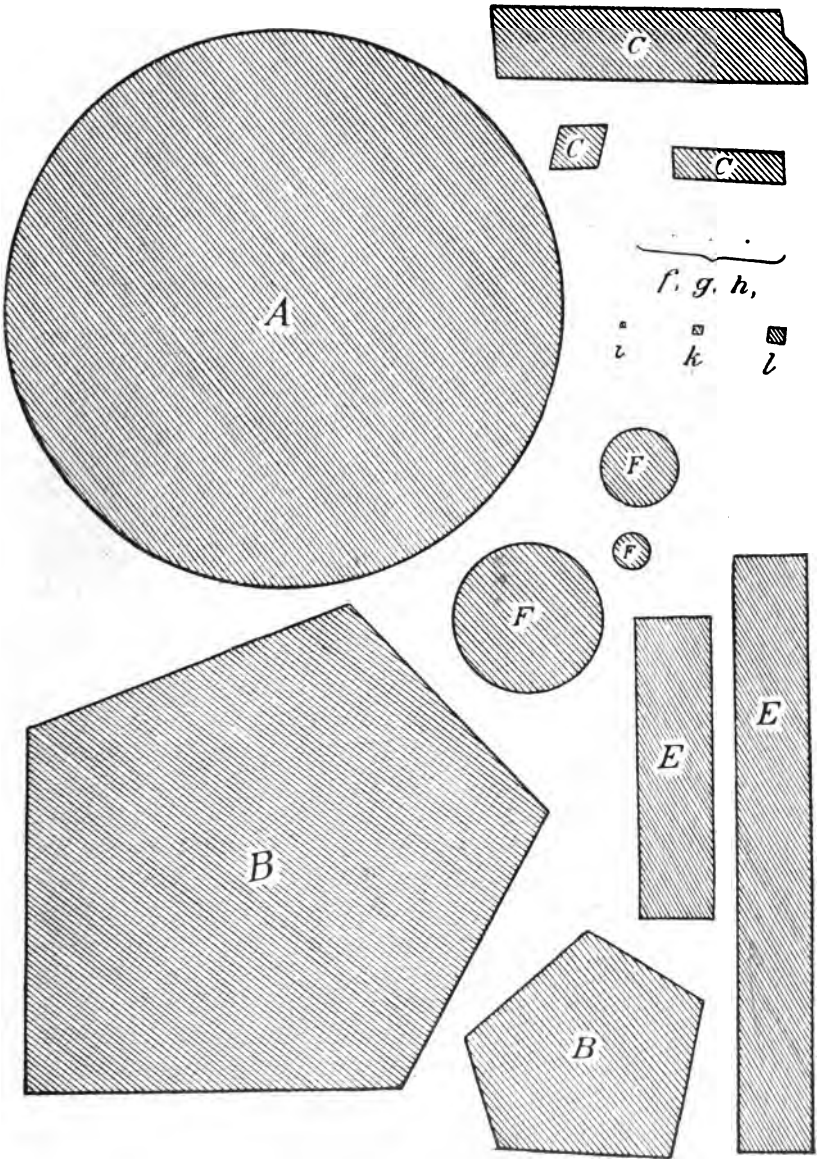


Abb. 31.

Eine Beobachtung an ultramikroskopisch kleinen Teilchen ist bisher nicht erwähnt worden, die jeden Beobachter aufs äußerste fesselt, das ist eine lebhafte Bewegung der Teilchen. Sie ist in geringem Grade schon unter dem gewöhnlichen Mikroskop an kleinen Partikeln zu sehen und zum erstenmal wohl von dem Engländer Brown im Jahre 1827 beobachtet und beschrieben worden, dem zu Ehren sie jetzt allgemein Brownsche Bewegung genannt wird. Sie ist bei verhältnismäßig großen Körperchen träge und langsam. Je kleiner aber die Teilchen werden, um so beweglicher sind sie. Das geht schließlich so weit, daß sie nur noch in den Umkehrpunkten zu

Abb. 32. Kinematographische Aufnahme der Brownschen Bewegung.
(Nach Perrin, Aufnahme Pathé frères.)

sehen sind. „Wer einen Schwarm tanzender Mücken sieht im Sonnenschein, der kann sich eine Vorstellung machen von den Bewegungen der Goldteilchen im Hydrosol des Goldes! Das ist ein Hüpfen, Tanzen, Springen, ein Zusammenprallen und Voneinanderfliehen, daß man Mühe hat, sich in dem Gewirre zurechtzufinden", so beschreibt Zsigmondy seinen ersten Eindruck. Auch an feinem, in der Luft schwebendem Staub, z. B. an Zigarrenrauch, kann man diese Erscheinung studieren. Man kann die Brownsche Bewegung selbst kinematographisch aufnehmen. Abb. 32 zeigt vier aufeinanderfolgende Momentbilder solch einer Aufnahme. Die Teilchen, die sich während und zwischen der Zeit der Aufnahmen auf den Beobachter zu oder von ihm fort bewegen, werden ihre Lage auf den einzelnen Teilbildern beibehalten, während die anderen sich wirr durcheinander mischen.

Was ist der Grund dieser Bewegung? Man hat sehr genaue Versuche angestellt, ob etwa das Licht, ob einseitige Erwärmung, Er-

schütterungen oder andere äußere Ursachen verantwortlich zu machen sind. Das ist nicht der Fall. Die Teilchen behalten ihre heftige Bewegung Stunden, Tage, Jahre hindurch unverändert bei, wohl bis in alle Ewigkeit, — wenn die Temperatur dieselbe bleibt. Erst in letzter Zeit ist man auf die richtige Deutung verfallen. Was ist natürlicher als die Annahme, daß die Bewegung, die wir sehen, von den Stößen der unsichtbaren Moleküle herrührt, uns also eine vergröberte Molekularbewegung sichtbar vor Augen führt; haben wir doch schon lange die Wärme als die Bewegung der Atome und Moleküle gedeutet! Es bereitet wirklich Genugtuung zu erleben, wie die Menschheit allmählich die Mittel in die Hand bekommt, um ihre kühnen Hypothesen, ihre Annahmen über die Existenz einer von uns nie gesehenen, unseren Sinnen vollständig entrückten Welt und deren Gesetzmäßigkeiten an so sinnfälligen Vorgängen gleichsam direkt auf ihre Richtigkeit nachzuprüfen.

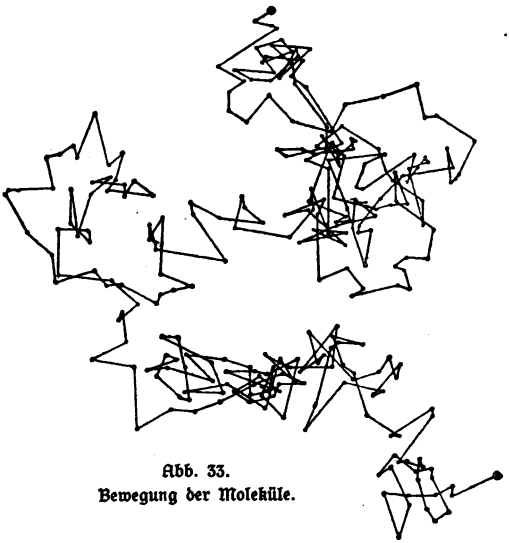


Abb. 33.
Bewegung der Moleküle.

Weshalb aber zeigen größere Partikel diese Brownsche Bewegung nicht? Sie hört bei einem Durchmesser von ungefähr 0,0004 cm auf. Das wird erklärlich, wenn man daran denkt, daß das schon riesengroße Körper gegenüber den Molekülen sind, viele, viele Billionen mal so groß; sie verhalten sich also zu den Molekülen wie etwa ein großer See zu einem Wassertropfen. Wenn die Moleküle alle in derselben Richtung stoßen würden, so würde das nichts ausmachen, denn schließlich beruht die Macht des Windes, der große Schiffe über den Ozean treibt, unter dessen plötzlichen Stoß dicke Bäume wie Streichhölzer splittern, auch auf der gleichsinnigen Bewegung vieler Moleküle. Was uns aber die Brownsche Bewegung

enthüllt, ist die Bestätigung der gänzlich ungeordneten Wärmebewegung der Moleküle, ist absolute Regellosigkeit. Perrin hat den Weg kleiner ultramikroskopischer Teilchen aufzuzeichnen versucht; nicht die vom Auge faßbaren Zickzacklinien der Flimmerbewegung, die sich bei den kleinsten der Beobachtung ganz entzieht; er hat sich ein einzelnes Teilchen vorgenommen und hat nach Ablauf regelmäßiger Zeitabschnitte, z. B. immer nach Ablauf von 30 Sek., den Ort aufgezeichnet, den es gerade einnahm. Die Verbindungslinie solch einer Punktreihe gibt Abb. 33 wieder. In ihr besteht jede gerade Linie in Wirklichkeit wieder aus einem unendlichen Wirrwarr von Einzelbewegungen. Angesichts dieser Regellosigkeit müssen wir annehmen, daß die großen Teilchen fortwährend und von allen Seiten von so unzähligen Stößen getroffen werden, daß keine Richtung überwiegt und alle sich gegenseitig in der Wirkung aufheben. Von einer gewissen Größe abwärts passiert es immer häufiger, daß die Stöße bald von der einen, bald von der anderen Seite derart überwiegen, daß eine kleine Pendelbewegung eintritt; sie geht mit zunehmender Kleinheit der Teilchen dann in eine lebhafte Flimmerbewegung über, die außerdem um so heftiger wird, je mehr das Gewicht der Teilchen sich dem der Moleküle nähert. Abb. 34 zeigt eine Momentaufnahme ultramikroskopisch kleiner Teilchen einer kolloidalen Silberlösung, deren mittlerer Durchmesser ungefähr 0,000 002 cm betrug. Die Aufnahme wurde auf einer sich langsam von oben nach unten bewegenden photographischen Platte gemacht. Die Teilchen beschreiben deshalb von oben nach unten gerichtete Kurven, die in den Augenblicken über- bzw. unterbelichtet sind, in denen die Bewegungsrichtungen in der Fallrichtung liegen, bzw. ihr entgegengesetzt sind. Die Leiter links ist eine Zeitmarke, die Sprossen-

Abb. 34. Brownsche Molekularbewegungen nach Siedentopf.

distanz entspricht $^1/_{50}$ Sekunde. Der schwarze Strich entspricht einem größeren am Deckglase fest anhaftenden Teilchen.

Was geschieht nun, wenn wir eine kolloidale Lösung langsam erwärmen? Wir müßten nach unserer Theorie eine Beschleunigung der Bewegungen beobachten. Svedberg (s. Abb. 35) hat zur genauen Beantwortung dieser Frage genaue Versuche mit kolloidalen Goldlösungen gemacht. Er hat nicht die Geschwindigkeiten direkt gemessen, dazu waren sie zu schwer faßbar. Er stellte zunächst folgende Überlegung an: Wenn man die kolloidale Lösung durch das Ultramikroskop beobachtet und die Beobachtungszeit durch einen regelbaren, meßbaren Momentverschluß allmählich kürzer gestaltet, so wird ein Augenblick kommen, in dem die Flimmerbewegung gerade noch als solche zu erkennen ist.*) Auf die Dauer dieser kurzen Beobachtungszeit kommt es an. Sie wurde, als Svedberg die kolloidale Goldlösung erwärmte, immer kürzer, d. h. die Bewegung der Teilchen wurde immer rascher; dies geschah in einem Maße, das vollständig den theoretischen Erwartungen über die Beschleunigung der Molekülgeschwindigkeiten mit der Temperaturerhöhung entsprach.

Man kann noch an viele andere Prüfungen unserer Molekulartheorie denken. Der osmotische Druck war z. B. von der molekularen Konzentration der Lösung abhängig, d. h. von der Anzahl, nicht aber von der Größe der Moleküle. Auch die kolloidalen Lösungen zeigen den osmotischen Druck; hier können wir die Abhängigkeit direkt sehen, denn wir können die Teilchen zählen; und da zeigt sich wirklich, daß der osmotische Druck mit der Abnahme der Teilchenzahl sinkt.

Es würde uns zu lange aufhalten, wollten wir uns noch weiter in der Genugtuung sonnen, die alle diese sinnfälligen Bestätigungen unserer Theorie gewähren. Nur an eine Stelle aus Lukrez sei in all dem Triumph still erinnert: „So ist unter des Urstoffs Körpern nirgend die Ruhe im unermeßlichen Weltraum, sondern sie jagt ein beständiger Trieb nach mancherlei Richtung, sprengt die einen zurück, wenn zusammen sie treffen und verbindet im engeren Raum die andern durch Anstoß."

---

*) Bei einer weiteren Verkürzung würden die Teilchen stillzustehen scheinen, etwa wie der fliegende Vogel auf einer photographischen Momentaufnahme.

Die uralte Frage nach dem Bau der Materie scheint nun tatsächlich dahin entschieden, daß alle Körper, auch wenn sie noch so klar und glatt aussehen, aus kleinsten, für sich bestehenden Teilchen, den Molekülen und Atomen aufgebaut sind. Man kann außerordentlich kleine Körperchen sichtbar machen. Andererseits gibt es sehr große Moleküle. Wir können künstlich solche zusammensetzen, die über tausendmal so schwer sind wie ein Wasserstoffmolekül. Noch viel größere liefert die Natur z. B. unter den Eiweißstoffen. Da erscheint es doch immerhin möglich, daß die größten unter ihnen noch im Ultramikroskop sichtbar zu machen sein müßten. Wie groß und wie schwer sind denn überhaupt diese wirklichen Moleküle? Kann man das nicht auch herausbekommen?

Abb. 35. Theodor Svedberg.

Nichts leichter als das! — können wir heute beinahe sagen. Aber das geht einem immer so: so lange man im Dunkeln tappen muß, um sich zurechtzufinden, macht man die überflüssigsten Anstrengungen und Umwege; sobald aber ein Lichtschein den Schauplatz erhellt, sieht man tausend Wege, die von allen Seiten zum Ziele führen. So auch hier. Lange Zeit ist man mit außerordentlich komplizierten Gedankengängen dem Problem auf den Leib gerückt und wußte doch nicht recht, ob man es auch wirklich richtig gepackt hatte. Zuletzt sind auf einmal zahlreiche Methoden bekannt geworden, die eine verhältnismäßig leichte Lösung der Aufgabe gestatten. Eine in ihrer verblüffenden Einfachheit ganz geniale Methode hat Perrin (s. Abb. 44) ersonnen, um das absolute Gewicht der einzelnen Moleküle und Atome zu bestimmen.

Zum Verständnis brauchen wir wieder eine kleine Vorgeschichte. Wir wissen, daß unsere Atmosphäre mit wachsender Entfernung vom

Erdboden immer dünner wird. Das erfährt jeder Alpentourist, jeder Ballonfahrer am eigenen Leib. Die dünnere Luft übt natürlich einen geringeren Druck aus, und diese Druckabnahme erfolgt mit zunehmender Höhe so gesetzmäßig, daß man mit dem Barometer allein und ohne andere Apparate die Erhebung über dem Meeresspiegel bestimmen kann. In 40 km Höhe würde der Druck nur noch 1,2, in 100 km Höhe 0,0012 mm Quecksilber betragen. Mit der Druckabnahme sollte aber eigentlich noch eine andere Veränderung unserer Atmosphäre erfolgen, nämlich in ihrer Zusammensetzung. Wir wissen, daß die Kohlensäure mit ihren schweren Molekülen an Orten, an denen sie sich in größeren Mengen entwickelt und nicht durch Winde fortgeführt wird, wie in der Hundsgrotte bei Neapel, sich unten am Boden lagert, so daß ein Hund unter Umständen rasch in ihr erstickt, während der größere Mensch über ihre Schicht hinausragt und nur noch einen weniger schädlichen Anteil einatmet. Je leichter aber ein Gas ist, um so langsamer nimmt sein Druck mit der Höhe ab. Deshalb müßten sich auch die übrigen Anteile der Luft, Argon, Sauerstoff, Stickstoff, Helium, Wasserstoff, in der angeführten Reihenfolge, entsprechend der verschiedenen Schwere ihrer Moleküle, abstufen; die schwereren Gase müßten mit zunehmender Höhe zurücktreten und mehr und mehr den leichten Gasen das Feld räumen. Das würde auch sicher der Fall sein, wenn keine Winde und Luftströmungen vorhanden wären. Diese sorgen aber für eine so gute Durchmischung, daß die Zusammensetzung der Luft bis zu ungefähr 11 km hinauf nahezu gleichmäßig ist. Sie besteht hier aus 780,3 Raumteilen Stickstoff, 209,9 Teilen Sauerstoff, 9,4 Teilen Edelgasen (Argon, Helium usw.), 0,3 Teilen Kohlensäure und 0,1 Teil Wasserstoff. Oberhalb der 11 km hört diese Durchmischung aber bald auf, und nun macht sich auch die Schichtenbildung bemerkbar, wie spektroskopische Beobachtungen an Lichterscheinungen in großen Höhen gezeigt haben. Die schwere Kohlensäure, die ja von Anfang an nur einen geringen Prozentsatz der Atmosphäre betrug, und das schwere Argon kommen hier nicht mehr in Betracht. Der Sauerstoff ist in 40 km Höhe auf ungefähr 10% gesunken und in 100 km Höhe verschwunden. Der Stickstoff nimmt ebenfalls rasch ab, so daß er bei 100 km Höhe vielleicht noch 1% beträgt. Die mit der Höhe sinkende Temperatur hat auf diese Druckabnahme auch einen Einfluß. Unter ihrer Be-

rücksichtigung berechnet sich die räumliche Zusammensetzung der Luft in folgender Weise:

	Stickstoff	Sauerstoff	Argon	Wasserstoff	Helium
50 km Höhe:	79,7 %	7,03 %	0,03 %	13,64 %	0,13 %
100 km Höhe:	0,10 %	0,00 %	0,00 %	99,45 %	0,45 %

Das Feld beherrschen also allmählich Helium und Wasserstoff, von denen auch das erstere noch höher hinauf zurücktritt, so daß schließlich nur noch der Wasserstoff übrig bleibt, dessen Höhengrenze man auf ungefähr 220 km schätzt; sie kann auch noch weiter draußen liegen. Ob dann noch ein leichteres Gas kommt, das wir noch nicht kennen, ist eine interessante Frage, die zwar besprochen, aber nicht entschieden ist.

Wenn die Dichteabnahme der einzelnen Gase der Atmosphäre mit der Höhe auch eine sehr verschiedene ist, so erfolgt sie für jedes einzelne Gas doch vollständig gleichmäßig und ist, besonders wenn wir diese Abnahme auf eine gleichbleibende Temperatur umrechnen, in gleichen Abständen immer dieselbe. Perrin hat sich ausgerechnet, in welchen Abständen die Dichte bei jedem Gas auf die Hälfte sinken würde. Darnach würde sich der Sauerstoff in Abständen von je 5, das Helium von je 40, der Wasserstoff von je 80 km auf die Hälfte verdünnen, d. h., in diesen Abständen würde, ganz gleich von wo ab man sie rechnet, die obere Schicht immer halb so dünn sein, halb so viel Moleküle im Liter enthalten als die untere. Vergleichen wir mit diesen Abständen die Molekulargewichte z. B. von Sauerstoff = 32, und Wasserstoff = 2, so fällt uns sofort auf, daß sich beide genau umgekehrt zueinander verhalten, 5 zu 80 wie 2 zu 32. Das ist sehr interessant, denn wenn wir ein bisher unbekanntes Gas in der Atmosphäre aufgefunden hätten, etwa das Helium, dessen Molekulargewicht wir noch nicht kennen, von dem wir aber wüßten, bei welchem Höhenunterschied seine Dichte auf die Hälfte fällt, so könnten wir allein daraus sein Molekulargewicht berechnen. Da dieser Höhenunterschied beim Helium 40 km beträgt, muß sein Molekulargewicht doppelt so groß sein als das des Wasserstoffes, also 4. Das ist es auch.

Dies ist die Vorgeschichte, bekannte Tatsachen. Nun kommt Perrins kühne Idee!

Wenn wir eine Atmosphäre von Molekülen zur Verfügung

hätten, deren absolutes Gewicht bekannt oder bestimmbar wäre, dann müßten wir durch dieselbe Berechnung auch das absolute Gewicht der Luftmoleküle berechnen können. Andererseits wissen wir, daß sich die Teilchen einer kolloidalen Lösung genau so verhalten, wie die Moleküle einer wirklichen Lösung, und damit auch wie die von Gasen; denn beide gehorchen den-

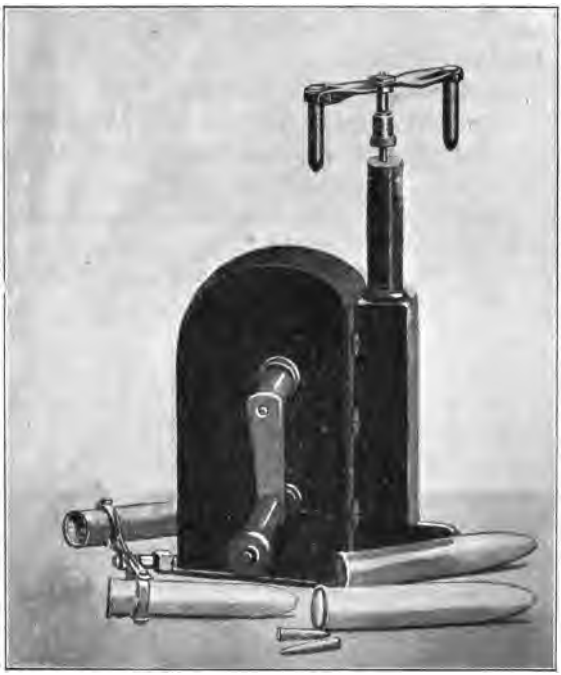


Abb. 36. Zentrifugalzylinder.

selben Gesetzen. Wie wäre es, wenn die Teilchen solch einer kolloidalen Lösung genau so wie die Moleküle der Luft eine mit der Höhe sich regelmäßig verdünnende Atmosphäre bildeten? Das Gewicht dieser Teilchen können wir ja feststellen, es brauchte nur noch jener Höhenunterschied gemessen zu werden, in dem die Anzahl der Teilchen auf die Hälfte sinkt, und das Problem wäre gelöst: ein Sauerstoffmolekül würde um so viel leichter sein wie ein Kolloidteilchen, als der Höhenunterschied, bei dem die Dichte der Sauerstoff- bzw. Kol-

loidatmosphäre auf die Hälfte sinkt, beim Sauerstoff größer ist wie in der Kolloidlösung.

Ja, wenn! Die Kolloidmoleküle könnten sich aber auch ebensogut alle im Laufe der Zeit zu Boden setzen, oder, — man kennt ja schon zahlreiche Fälle, in denen das nicht der Fall ist, — sie könnten entweder vollständig gleichmäßig oder ganz ungleichmäßig durch die Lösung verteilt sein. Um sich hierüber zunächst Gewißheit zu verschaffen, suchte Perrin eine kolloidale Lösung herzustellen, deren Teilchen alle ungefähr gleich groß waren. Dies war eine für die Entscheidung ganz unerläßliche Vorbedingung, deren Erfüllung sehr viel Arbeit machte. Wir wollen den Arbeitsgang hier einmal verfolgen, um den dornigen, mühevollen Weg vom glücklichen Gedanken bis zum praktischen Ergebnis kennen zu lernen.

Perrin wählte zu seinen Versuchen das gelbe Gummiharz, „Gummigutt" und das Baumharz „Mastix". Diese Harze besitzen vor anderen Stoffen den Vorzug, daß ihre Teilchen nicht zusammenkleben. Das Gummigutt löste er in Alkohol und goß diese Lösung in viel Wasser, in dem Gummigutt ganz unlöslich ist. Der Alkohol verteilt sich sofort in der ganzen Wassermasse und das Gummigutt ballt sich zu kleinen Kügelchen von ganz verschiedener Größe zusammen, die eine kolloidale Lösung bilden. Um zunächst alle störenden Verunreinigungen fortzuschaffen, wurden die Teilchen in einer Zentrifuge, die in der Minute 2500 Umdrehungen machte, vom Wasser abgeschleudert. (Abb. 36 zeigt eine einfache Zentrifuge. Die in ihr herabhängenden Zylinder stellen sich beim Drehen wagerecht.) Dann wurden sie wiederholt mit reinstem Wasser angeschlemmt und wieder abgeschleudert. Da hierbei die gröberen Teilchen sich zuerst absetzen, dann nach und nach die immer feineren, konnten die verschiedenen Anteile herausgenommen und für sich in derselben Weise weiter behandelt werden. So gelang es in einigen Monaten durch Verarbeitung von 1 kg Gummigutt eine kolloidale Lösung von einigen Zehntel-Gramm zu erhalten, deren Teilchen annähernd gleich groß waren.

Jetzt kam die Untersuchung! Zuerst konnte festgestellt werden, daß die Lösung sich zwar oben klärte, daß aber zum Schluß doch eine beständige „Atmosphäre" übrig blieb. Schon der rohe Augenschein zeigte weiter, daß auch die Verteilung der Teilchen scheinbar gesetzmäßig von oben nach unten dichter wurde. Man stelle sich aber nicht vor, daß Perrin diese Feststellung an hohen Flüssigkeitssäulen in hohen

Glaszylindern vornahm. Die Schichten, in denen sich seine Gummiguttatmosphären ausbildeten, waren $^1/_{10}$ mm dick und wurden unter dem Mikroskop beobachtet. Die Teilchen selbst hatten einen ungefähren Durchmesser von 0,0014 mm. Durch das Mikroskop sieht

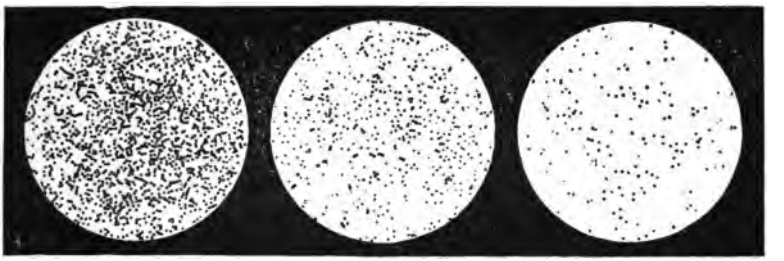


Abb. 37. A Schichten aus verschiedenen Höhen einer beständigen kolloidalen Mastixemulsion. (Durchmesser der Teilchen 0,001 mm, Abstand der Schichten 0,012 mm.)

man bei starker Vergrößerung immer nur die Teilchen einer äußerst dünnen Schicht scharf und deutlich; die der höheren und tieferen Schichten bleiben undeutlich und entziehen sich dem Blick. Je nachdem man also das Mikroskop höher oder tiefer einstellt (die Verschiebung ist sehr genau meßbar), bekommt man höhere oder tiefere Schichten deutlich zu sehen. Diese Schichten wurden photographiert. In Abb. 37 und 38 sind solche Aufnahmen wiedergegeben. Auf den Bildern konnte Perrin die Anzahl der Teilchen in aller Ruhe auszählen und die Dichteabnahme mit der Höhe feststellen. In einem Fall waren die Schichten 0,006 mm voneinander entfernt; auf den zugehörigen Bildern wurden von unten nach oben folgende Teilchenzahlen festgestellt:

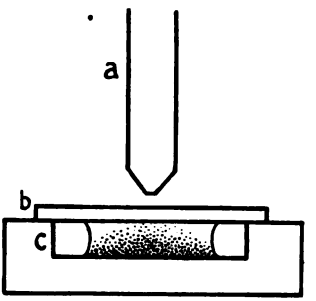


Abb. 38. Anordnung von Perrin zur Untersuchung der Dichteverteilung von Kolloidteilchen. a Objektiv des Mikroskops, b Deckglas, c 0,1 mm hohe kolloidale Lösung.

1880 940 530 305.

In einem andern Fall wurden Teilchen mit einem Durchmesser von 0,000414 mm in Abständen von 0,03 mm ausgezählt; dabei erhielt man folgende Zahlen:

100 47 22,6 12

Daraus ergab sich, daß die Dichte in gleichen Abständen gleichmäßig abnahm, genau wie in der Luft.*) Um ganz sicher zu gehen, wurden die Versuchsbedingungen in weiten Grenzen abgeändert. Es wurden sehr kleine und sehr große Teilchen untersucht, statt Wasser wurde das dicke Glyzerin genommen, die Temperatur wurde abgeändert, immer zeigte sich dieselbe Gesetzmäßigkeit der Dichteverteilung.

Kein Zweifel also, die gleichen Gesetze beherrschen die Moleküle der atmosphärischen Luft und die der kolloidalen Lösungen. Das ersehnte Ziel ist erreicht. Wir können jetzt den kühnen Sprung von dem 5-km Höhenunterschied beim Sauerstoff zu dem von 0,005 mm in der Kolloidlösung machen; in beiden Fällen sinkt die Dichte, d. i. die Anzahl der Teilchen, auf die Hälfte. Um diesen Unterschied, d. h. hundertmillionenmal, muß das Molekül des Sauerstoffs leichter sein als so ein Kolloidteilchen. Doch nicht das richtige Gewicht des Gummigutteilchens ist der Rechnung zugrunde zu legen, sondern erst ist noch das Gewicht eines gleich großen Wassertropfens abzuziehen, um das das Teilchen in dem Wasser durch den Auftrieb leichter gemacht wird. Alles dies in Betracht gezogen, ergab sich das Gewicht eines Moleküls Sauerstoff zu $47 \cdot 10^{-24}$ g. Das Molekül Wasserstoff würde dann $2{,}94 \cdot 10^{-24}$ g wiegen.

Nun ist mit einem Schlage das wirkliche Gewicht sämtlicher Moleküle und Atome bekannt. Es ist durch das bekannte Verhältnis der Molekular- und Atomgewichte gegeben, deren sich die Chemiker bei ihren Berechnungen bedienen, und deren Ableitung wir ausführlich erörtert haben. Am bequemsten ist es, wenn man mit dem gefundenen wirklichen Gewicht des Moleküls Sauerstoff die Zahl der Moleküle berechnet, die auf 32 g Sauerstoff, also das Molekulargewicht in Grammen gehen; das würden $7 \cdot 10^{23}$ sein. Diese Zahl wird mit N bezeichnet; sie wird in wissenschaftlichen Berechnungen vielfach verwendet. Will man das wirkliche Gewicht des Moleküls eines beliebigen Stoffes, z. B. von Zucker oder Eiweiß wissen, so braucht man nur sein relatives Molekulargewicht, das beim Rohrzucker z. B. 342, bei der Kohlensäure 44 beträgt, durch diese Zahl N, also durch $7 \cdot 10^{23}$ zu dividieren. Mit Hilfe dieser Zahl können wir aber auch sonst noch alle möglichen interessanten Berech-

*) Die kleinen Unterschiede in den einzelnen Zahlen sind auf Fehlerquellen zurückzuführen, die beim Arbeiten mit so kleinen Stoffmengen unvermeidlich sind.

nungen anstellen, z. B. die, wieviel Moleküle in einem Wassertropfen enthalten sind. Diese Mühe hat sich jemand gemacht; er hat gefunden, daß es ungefähr ebensoviel sind, als das Mittelländische Meer Tropfen hat, auf jeden Fall eine unfaßbar große Zahl.

Es wird nun gut sein, wenn wir uns noch zu vergewissern suchen, ob denn die von Perrin erhaltenen Ergebnisse auch zuverlässig sind. Schon lange vor ihm hatte man die absolute Größe der Moleküle zu bestimmen versucht. Man hatte die Zahl N durch geistreiche Überlegungen unter Berücksichtigung der wahrscheinlichen Geschwindigkeit der Moleküle, der durchschnittlichen Weglänge ihrer Bewegungen, dem Reibungswiderstand in Gasen, dem wahrscheinlichsten Raum, den die Massen sämtlicher Moleküle einer bestimmten Stoffmenge einnehmen, wenn man die leeren Zwischenräume wegdenkt, usw., zu errechnen versucht, also durch eine Überlegungsreihe, in der tausend „Wenn" steckten; und man war, das ist sehr interessant, zu ungefähr derselben Zahl gekommen wie Perrin.

Von einer ganz anderen Überlegung ausgehend, hatte Rayleigh die ungefähre Größe von N geschätzt. Er hatte das blaue Himmelslicht dazu hergenommen, von dem wir schon wissen, daß es von den Luftmolekülen abgebeugtes, polarisiertes Sonnenlicht ist (s. S. 66). Rayleigh maß zunächst die Intensität des direkten Sonnenlichtes und dann die Stärke des senkrecht von seiner Richtung abgebeugten Sonnenlichtes, d. h. die des zerstreuten blauen Himmelslichtes. Mit Hilfe dieser Größen suchte er auszurechnen, wie klein die Luftmoleküle sein müßten, damit das beobachtete Stärkeverhältnis die angenommene Ursache habe. Er fand dabei, daß die Zahl N zwischen $3 \cdot 10^{28}$ und $15 \cdot 10^{28}$ liegen würde, eine Genauigkeit, die bei der Unsicherheit der benutzten Grundlagen befriedigend ist.

In rascher Aufeinanderfolge sind dann von allen Seiten Zugänge zu dieser Zahl N geschaffen worden, auf die wir trotz ihrer Bedeutung hier nicht näher eingehen können. Es sei nur angedeutet, daß sich u. a. aus den radioaktiven Erscheinungen recht genaue Zahlen ableiten lassen, und daß noch genauere durch das Studium elektrischer Erscheinungen, und zwar durch die Bestimmung der Größe der kleinsten elektrischen Ladung erhalten worden sind, so daß ein Zweifel an der ungefähren Richtigkeit nicht mehr aufkommen kann.

Bei der Wichtigkeit dieser Zahlen wollen wir noch auf eine interessante Untersuchungsreihe ein wenig näher eingehen, die Svedb-

berg unter vielen anderen angestellt hat. Sie stützt sich auch auf die Brownsche Molekularbewegung und ermöglicht eine vorzügliche direkte Nachprüfung der Perrinschen Versuche, sowie der sonstigen Berechnungen. Th. Svedberg (s. Abb. 35) arbeitete mit kolloidalen Goldlösungen und sehr kleinen Teilchen. Er schichtete eine solche Kolloidlösung in hierfür besonders erdachtem Apparat vorsichtig unter reines Wasser. Die Goldteilchen wanderten trotz ihrer Schwere infolge ihrer Beweglichkeit langsam in das reine Wasser hinauf; man nennt diesen Vorgang Diffusion.*) Nach einer bestimmten Zeit hob Svedberg das über der ursprünglichen Kolloidlösung befindliche Wasser in mehreren Schichtenfolgen ab und bestimmte ihren Gehalt an Gold. Dieser Gehalt war ähnlich wie bei den Versuchen Perrins in ganz gesetzmäßiger Weise oben geringer als unten. Bei höherer Temperatur erfolgte die Wanderung rascher, übereinstimmend mit der Erwartung. Aus den erhaltenen Zahlen konnte Svedberg zunächst die Wanderungsgeschwindigkeit berechnen. Da diese von der Größe der Teilchen abhängt, bei großen Teilchen kleiner und bei kleinen größer ist, konnte er mit ihr unter Berücksichtigung des Wasserwiderstandes, der Temperatur und der Zahl N die Größe der Teilchen ermitteln. Für N wurde die aus allen Versuchen als genaueste erscheinende Zahl $6 \cdot 10^{23}$ eingesetzt. Dann ergab sich der Durchmesser der Teilchen zu 0,000 000 258 cm.

Nun kommt die Nachprüfung! Die Größe der Teilchen konnte auch auf anderem, direkterem Wege festgestellt werden, und zwar durch die Bestimmung der Teilchenzahl, in die sich eine bestimmte Goldmenge geteilt hat. Nach dieser direkten Bestimmung betrug der Teilchendurchmesser 0,000 000 266 cm. Das ist eine Genauigkeit der Übereinstimmung, wie man sie bei derartig schwierigen Untersuchungen nicht besser erwarten kann. Umgekehrt konnte Svedberg natürlich aus der direkt bestimmten Größe der Goldteilchen die Zahl N berechnen; dabei erhielt er den Wert $6{,}2 \cdot 10^{23}$. In der Nähe dieser Zahl dürfte auch der tatsächliche Wert für N, für die Anzahl der Moleküle in dem Molekulargewicht in Grammen, liegen. So kreuzen sich alle Wege, von welchem Gebiet der Natur sie auch zur Bestimmung von N ausgehen, in einem Punkt, und liefern einen glänzenden Beweis mehr für das wirkliche Dasein der Moleküle, wenn es eines

*) Auf dieselbe Weise verteilt sich auch ein Stück Zucker in einem Glas Wasser, ohne daß wir umrühren.

solchen überhaupt noch bedürfte. Es gilt nur noch, die Genauigkeit dieser Bestimmungen so zu erhöhen, daß einmal eine endgültige, einwandfreie Zahl festgelegt werden kann.

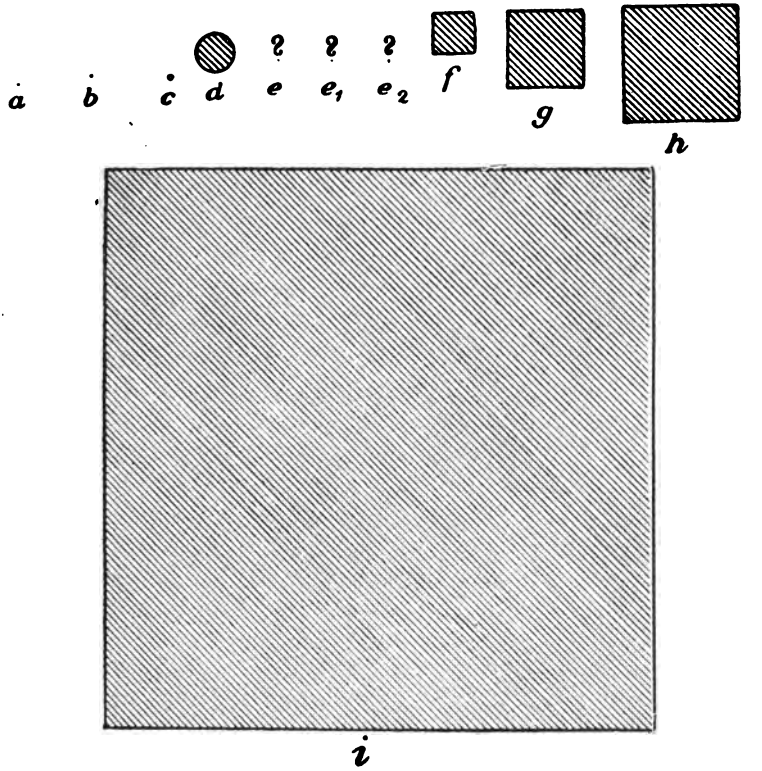


Abb. 39. Bringt in millionenfacher Vergrößerung den Vergleich einiger ultramikroskopischer und molekularer Teilchen nach Zsigmondy. f, g, h und i entsprechen denselben Zeichen der Abbildung auf S. 67.

a Wasserstoffmolekül, b Alkoholmolekül, c Chloroformmolekül, d Molekül der löslichen Stärke. e, e_1 und e_2 unsichtbare Teilchen einer kolloidalen Goldlösung, f, g, h nur im Ultramikroskop sichtbare Goldteilchen, deren Durchmesser 0,000 0006, 0,000 001 und 0,000 0015 cm beträgt, i größeres Goldteilchen, Durchmesser 0,000 0075 cm.

Für unsere Berechnungen wollen wir vorläufig $N = 6 \cdot 10^{23}$ annehmen. Dann wiegt ein Molekül Wasserstoff ungefähr $3{,}33 \cdot 10^{-24}$ g und sein Atom $1{,}66 \times 10^{-24}$ g. Wenn wir mit dieser Zahl die auf S. 56 aus der Dicke einer Ölhaut auf Wasser geschätzte vergleichen, zeigt sich, daß beide nahe zusammenfallen, so daß eine

solche Ölhaut tatsächlich nur aus einer Doppelschicht von Ölmolekülen besteht. Da das Molekulargewicht des Fluoreszëins 342 beträgt, können wir ausrechnen, daß die Fluoreszëinmenge, die wir in einem Wassertropfen gerade noch an der Fluoreszenz erkannten (s. S. 56), aus ungefähr 2000 Molekülen besteht, so daß wir dort noch recht weit von der Sichtbarkeit der Moleküle entfernt waren. Und bei der geringen Merkaptanmenge gar, die wir noch riechen können (s. S. 53), würden im Nasenhohlraum noch $2{,}5 \cdot 10^{10}$, das sind 25 Tausendmillionen Merkaptanmoleküle herumwimmeln. Wir könnten auch ausrechnen, aus wieviel Atomen die kleinsten im Ultramikroskop deutlich sichtbaren Goldteilchen bestehen. Sie wiegen $1{,}2 \times 10^{-15}$ g. Das Goldatom wiegt, da das Atomgewicht des Goldes 196,7 beträgt, $\frac{196{,}7}{6 \cdot 10^{23}} = 3{,}28 \cdot 10^{-22}$ g. Also ist das kolloide Goldteilchen aus $\frac{1{,}2 \times 10^{-15}}{3{,}28 \times 10^{-22}}$ Atomen zusammengesetzt, das sind 3½ Millionen Stück. Das ist noch ein etwas riesenhaftes Molekül! Wie groß ist dagegen wohl ein Eiweißmolekül? Für das Eiweiß der roten Blutkörperchen des Rindes hat man ein ungefähres Molekulargewicht von 16569 bestimmt; es soll aus 2378 Atomen nach der Formel $C_{758}H_{1203}N_{195}O_{218}S_3Fe$ aufgebaut sein. Dividiert man 16569 durch $6 \cdot 10^{23}$, so erhält man als wirkliches Gewicht des einzelnen Moleküls $2{,}76 \cdot 10^{-20}$ g, eine gegenüber dem Gewicht des Goldteilchens sehr kleine Zahl. Anders steht es mit dem Durchmesser dieses Eiweißmoleküls gegenüber dem des kleinsten sichtbaren Goldteilchens. Er ist zu ungefähr 0,000 000 25 cm geschätzt worden, ist also nur halb so groß wie der des letzteren. Wenn dieser Unterschied auch gering ist, so zeigt er doch zur Genüge, daß uns das Ultramikroskop das Reich der echten chemischen Moleküle noch nicht erschließt. Dieses Ziel ist also noch zu erstreben.

„Der Welten Kleines auch ist wunderbar,
und aus dem Kleinen bauen sich die Welten."

IV.

Haben wir nun die Atome der alten Philosophen gefunden, oder ist es uns ähnlich ergangen wie Kolumbus! Mit unvollkommener Ausrüstung, aber unerhörter Kühnheit, war er ausgezogen, einen neuen Seeweg nach Ostindien zu finden, und er entdeckte — Amerika.

Mit ebenso großer Kühnheit und ebenso unzureichender Ausrüstung trat die Forschung die Entdeckungsreise zu den sagenhaften Atomen der alten Philosophen, den letzten, unteilbaren Einheiten aller Stoffe an; langsam nur kam man vorwärts, unter fortwährender Verbesserung der Hilfsmittel. Endlich aber sichtete man die Gestade einer neuen, unbekannten Welt — man fand die Moleküle und Atome der Physiker und Chemiker. Der Weg zu den letzten, unteilbaren Einheiten des Weltalls aber führt über sie hinaus in noch unbekannte Fernen. Kühne Forscher sind auch dorthin schon unterwegs. Ihnen zu folgen, ist unsere Aufgabe heute nicht. Dafür wollen wir uns das eroberte Gebiet, das wir in Gedanken schon lange besiedelten, noch etwas näher ansehen.

Der erste und schönste Erfolg, den wir verzeichnen können, ist das stolze Gefühl des sicheren Besitzes. Wir stehen jetzt auf festem Grunde; der Zwiespalt in unserer naturwissenschaftlichen Seele ist überwunden. Kurze Zeit vorher noch setzte man den Fuß mit einiger Vorsicht und allerlei Vorbehalt auf diesen Boden, wußte man doch nicht sicher, ob er nicht eines Tages nachgeben und das ganze, schöne Gedankengebäude in schwarze Tiefen begraben würde. Gab es doch immer noch vorsichtige Köpfe, hauptsächlich philosophisch veranlagte, die lieber andere Wege versuchten.

So finden wir noch in einer im Jahre 1904 von Ostwald herausgegebenen volkstümlichen Schule der Chemie das folgende bemer-

kenswerte Zwiegespräch zwischen Lehrer und Schüler: Der Schüler äußert die Vermutung, daß alle die Gesetzmäßigkeiten der stofflichen Veränderungen in der Natur doch einen tieferen Zusammenhang haben müßten, daß sich etwas Besonderes in ihnen unseren Blicken verbergen müsse. Darauf der Lehrer: „Ja so! Das ist allerdings ganz kindlich gedacht, ebenso wie der Bauer dachte, als man ihm die Lokomotive zu erklären versucht hatte. Er sagte: das habe ich alles ganz gut verstanden, aber wo ist denn eigentlich das Pferd, welches alle die Wagen zieht?" Dieses verborgene Pferd, erklärte der Lehrer dann, wären die Atome der Chemiker. Nun, inzwischen hat sich auch Ostwald als echter Naturforscher, für den es keine Dogmen gibt, dem Gewicht der Tatsachen gebeugt und erklärt, daß er sich durch die neuesten Forschungen vom Dasein der Atome und Moleküle habe überzeugen lassen. Eine der nächsten Aufgaben ist jetzt, das begonnene Werk fortzusetzen und die Rolle der Atome und Moleküle in der Natur restlos zu erforschen. Trotzdem hier schon sehr viel geschehen ist, z. B. in dem weit ausgreifenden Lehrgebäude der Chemie, stoßen wir doch noch überall auf außerordentliche Schwierigkeiten. Wir wollen uns daraufhin ein Gebiet, das uns schon öfter beschäftigt hat, noch etwas genauer ansehen, und zwar die Wärme in der Natur als verursacht durch die Bewegung der Atome und Moleküle.

Am einfachsten liegen die Verhältnisse bei den Gasen, in deren Ausdehnungsbestreben die Bewegungsenergie der Moleküle direkt in Erscheinung tritt; — sie wird ja von uns zum Antrieb von Arbeitsmaschinen verwendet. Wie groß ist wohl die Geschwindigkeit solch eines Gasmoleküls? Die Berechnung ist nicht schwer. Nehmen wir z. B. einen bestimmten Raumteil unserer Luft bei 0° und gewöhnlichem Atmosphärendruck. Diesem Atmosphärendruck, den wir leicht durch das Gewicht der Quecksilbersäule des Barometers bestimmen können, und der für 1 qcm 1033,3 g beträgt, muß unsere Luftmenge standhalten, sonst würde sie zusammengedrückt werden. Sie tut es durch die Bewegungsenergie ihrer Moleküle, deren Gesamtmasse wir ja wägen können. Unbekannt ist allein die Geschwindigkeit, die wir jetzt aus den uns bekannten Größen, aus dem Druck und aus dem Gesamtgewicht der Moleküle berechnen können. Tut man das, so findet man für das Molekül Sauerstoff bei 0° die riesige Geschwindigkeit von 460 m, für das Stickstoffmolekül von 490 m in

der Sekunde! Das sind Geschwindigkeiten, die denen von Gewehrkugeln gleichen. Sie werden aber von der Geschwindigkeit des Wasserstoffmoleküls bei weitem übertroffen, das zum Ausgleich für sein geringes Gewicht eine Geschwindigkeit von 1840 m in der Sekunde besitzt.*) Allerdings darf man sich nicht vorstellen, daß die Luftmoleküle unter gewöhnlichen Verhältnissen derartige Strecken durchfliegen. Dann müßte die Ausbreitung der Wärme, die Vermischung der Gase, die Ausbreitung der Gerüche mit derselben Geschwindigkeit erfolgen. Wir wissen, daß das nicht der Fall ist. Mißt man die Geschwindigkeit dieser Vorgänge, so muß man die Wegstrecken schätzen können, die die Moleküle tatsächlich ungehindert durchfliegen können; sie dürften nicht groß sein, wenn man daran denkt, daß in 1 ccm Luft bei 0° etwa 27 bis 30 Milliarden Moleküle herumwimmeln, die natürlich fortwährend zusammenstoßen; die freien Wegstrecken betragen ungefähr ein Zehntausendstel-Millimeter (0,0001 mm). Dabei ereignen sich in der Sekunde ungefähr 5 Milliarden Zusammenstöße. Wenn wir die Luft verdünnen, so werden die ungestörten Flugbahnen natürlich länger. Für den, der Freude an großen Zahlen und derartigen Berechnungen hat, mögen folgende Andeutungen gemacht werden.

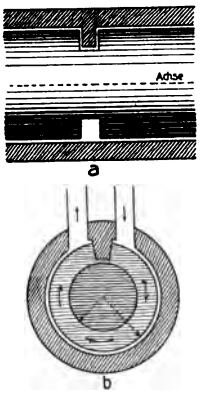


Abb. 40 a u. b sollen in einem Längsschnitt (a) und einem Querschnitt (b) das Prinzip der Molekularluftpumpe von Gaede veranschaulichen.

Wir können durch vorzügliche Luftpumpen außerordentlich weitgehende Verdünnungen herbeiführen, so daß der Innendruck unmeßbar klein wird. Der niedrigste noch meßbare Druck beträgt ungefähr 0,000 0001 mm Quecksilberhöhe. Bei dieser großen Verdünnung würden in 1 ccm Luft bei 0° aber immer noch 2 680 000 000 Moleküle vorhanden sein. Diese Zahl erscheint sehr groß; bei der Kleinheit der Moleküle verschwinden diese jedoch gegenüber dem Raum, auf den sie verteilt sind. Sie würden, wenn man 1000 cbm der so verdünnten Luft verflüssigen würde, vielleicht 1 cbmm aus-

*) Diese Berechnungen geben uns jedoch, darüber wollen wir uns klar sein, nur die durchschnittliche Geschwindigkeit aller Moleküle. Die einzelnen werden sich infolge der vielen Zusammenstöße manchmal noch rascher, manchmal auch langsamer bewegen.

füllen. Jetzt sind auch die freien Wegstrecken schon größer, vielleicht Dezimeter lang.

Diese Überlegungen finden eine wundervolle Bestätigung in dem Verhalten einer neuartigen Luftpumpe, die von Gaede konstruiert worden ist. Er hat sie ihrer hohen Leistungsfähigkeit und der Art ihrer Wirksamkeit wegen Molekularluftpumpe genannt und hat, was uns hier ganz besonders interessiert, mit ihr einen direkten Beweis dafür geliefert, daß die Wärme der Gase in der Bewegung ihrer Moleküle besteht. Der Bau dieser Luftpumpe, der auf einem ganz eigenartigen Gedanken beruht, ist im Prinzip folgender: Ein Zylinder paßt in einen zweiten haarscharf hinein, so daß er sich in ihm gerade ohne Reibung um seine Achse drehen kann. Um den Innenzylinder läuft eine ungefähr 2 cm tiefe und 0,5 cm breite Rinne, in die von dem Außenzylinder her ein genau passender Zapfen hineinragt, wie es Abb. 40a im Längsschnitt zeigt. Abb. 40b zeigt einen Querschnitt durch den Zylinder an der Stelle, an der sich die Rinne befindet, in die von oben der Zapfen hineinragt; die gestrichelten Pfeile sind die Radien des ganzen und des durch die Rinne verengerten Innenzylinders. Rechts und links vom Zapfen führen Röhren von der Rinne nach außen.

Was geschieht nun, wenn wir den Innenzylinder in der Richtung der Pfeile in lebhafte Drehung versetzen? In dem Luftraum der Rinne schießen die Moleküle ganz unregelmäßig hin und her. Diejenigen, welche auf den Innenzylinder aufprallen, erhalten einen lebhaften Stoß in der Bewegungsrichtung des Zylinders, im Sinne der Pfeile. Die Folge davon ist, daß die Moleküle von der rechten Seite des Zapfens nach der linken befördert werden. Verbinden wir die rechte Röhre luftdicht mit einem geschlossenen Gefäß, einem Glaskolben z. B., so wird dieser allmählich luftleer werden, nicht wahr? Das ist aber so ohne weiteres doch nicht der Fall. Zunächst wird ja der Grad der Luftverdünnung auf der abgeschlossenen rechten Seite des Zapfens von der Drehgeschwindigkeit des Zylinders abhängen, das ist ohne weiteres einleuchtend. Dann aber wird, so lange die Luft noch ziemlich dicht ist, der Zusammenstoß der Moleküle untereinander ein so häufiger sein, daß die Schleuderwirkung des Zylinders in diesem Polster von Luftmolekülen gedämpft und abgeschwächt wird. Es werden eine große Anzahl von Molekülen immer wieder den Weg von der linken nach der rechten Seite des

Zapfens zurückfinden. Herrscht also auf der linken Seite Atmosphärendruck, oder auch nur der Druck einer halben Atmosphäre, so wird die Pumpe unbrauchbar sein. Anders wird es dagegen, wenn auf der linken Seite des Zapfens durch eine andere Vakuumluftpumpe*) schon ein luftverdünnter Raum erzeugt wird. Ist der Druck z. B. so weit erniedrigt, daß die einzelnen Moleküle von einer Seite der Rinne zur anderen fliegen können, ohne mit anderen zusammenzustoßen, so wird, wenn die Drehgeschwindigkeit der Zylinderoberfläche ebenso groß oder größer als die Molekulargeschwindigkeit ist, schwerlich ein Molekül von links nach rechts durchkommen können; es wird immer wieder zurück- und schließlich hinausgeschleudert. Jetzt erst wird die Pumpe ihre Leistungsfähigkeit zeigen können. Diese wird noch dadurch erhöht, daß auf dem sich drehenden Zylinder mehrere Rinnen nebeneinander angebracht und derart miteinander verbunden sind, daß immer die wie in Abb. 40b rechts vom Zapfen stehende Röhre der ersten Rinne mit der linken der folgenden verbunden ist; die Wirkung wird dann der Anzahl der Rinnen entsprechend vervielfacht. Mit dieser Pumpe ist bei 12000 Umdrehungen des Zylinders in der Minute und einem Vorvakuum von 0,05 mm Quecksilberdruck eine meßbare Verdünnung bis auf 0,0000002 mm Quecksilberdruck erzielt worden; das ist der niedrigste Druck, der je gemessen worden ist. Es sind mit der Molekularluftpumpe wohl noch niedrigere Drucke erreicht worden, eine Grenze in der Leistungsfähigkeit ist ja nicht ersichtlich, nur kann unsere Meßkunst weiter hinunter nicht mehr folgen. In welcher Weise das Vorvakuum maßgebend für das Endvakuum ist, zeigen folgende Zahlen:

Bei 12000 Umdrehungen und einem Vorvakuum von:

20	mm	Druck	wurde	ein	Endvakuum	von	0,0003	mm erreicht
10	„	„	„	„	„	„	0,00003	„ „
1	„	„	„	„	„	„	0,000005	„ „
0,05	„	„	„	„	„	„	0,0000002	„ „

Sinkt die Anzahl der Umdrehungen auf 2500, so wird bei einem Vorvakuum von 0,05 mm Druck nur ein Endvakuum von 0,0003 mm erreicht.

Beruht die ganze Konstruktion der Pumpe auf der Voraus-

*) Das Wort Vakuum bedeutet luftleerer Raum.

setzung der Bewegung der Gasmoleküle, so ist die Art ihrer Wirksamkeit der beste Beweis für die Richtigkeit dieser Voraussetzung. Aber auch dafür, daß wir in der Molekularbewegung die innere Natur der Wärme eines Gases vor uns haben, läßt sich mit der Molekularluftpumpe der direkte Nachweis führen. Wenn nämlich der Zylinder sich dreht, so werden alle Moleküle, die auf die linke Seite des Zapfens in Abb. 40b aufschlagen, eine um die Geschwindigkeit der Zylinderoberfläche größere Geschwindigkeit besitzen, wie die auf die rechte Seite des Zapfens auftreffenden. Die Temperatur müßte also auf der linken Seite höher sein als auf der rechten. Gaede hat den Unterschied mit einem elektrischen Thermometer, einem sog. Thermoelement, gemessen, und ihn bei 8000 Umdrehungen und einem Druck von 0,01 mm Quecksilber zu 1,9° gefunden. Aber auch hierbei ließ die Wirkung mit zunehmender Dichte des Gases, d. h. bei zunehmendem Luftdruck rasch nach. Bei Atmosphärendruck lag der Unterschied unterhalb von 0,01°, war also so gut wie verschwunden. Das ist dadurch zu erklären, daß die Moleküle mit zunehmender Dichte der Luft zu häufig miteinander zusammenstoßen und dadurch die anfängliche höhere Geschwindigkeit bald wieder verlieren. Es bilden sich aber außerdem auch noch störende Luftwirbel. Bei genügender Verdünnung dagegen können die von dem Zylinder fortgeschleuderten Moleküle ihre erhöhte Geschwindigkeit ziemlich ungeschwächt beibehalten. Die Versuche zeigen, daß eine mechanische Beschleunigung der Molekularbewegung sich als höhere Temperatur bemerkbar macht; damit ist endlich der direkte Beweis für die alte Annahme geliefert, die wir ja schon öfter benutzt haben, daß die Wärme der Gase nichts anderes ist als die unsichtbare Bewegung ihrer Moleküle.

Welch eine Menge ungenutzter Energie steckt in dieser ruhelosen Bewegung! Wenn man nur die Moleküle von 2 g Wasserstoff von 0° so vor eine Maschine spannen könnte, daß sie unter Arbeitsleistung zum Stillstand kämen, so würde man 4⅔ Pferdekräfte gewinnen, d. i. eine Kraft, mit der man 350 kg um einen Meter heben kann. Und nun der ungeheure Wärmevorrat, der in unserer ganzen Atmosphäre, in dem Wasser der Weltmeere steckt! Der Erfinder, der diese Molekularenergie für uns nutzbar macht, wird wohl nie geboren werden. Er müßte es fertig bringen, die gänzlich ungeordnete Bewegung der Moleküle in eine gleiche Richtung zu lenken.

Eine derartige Möglichkeit besteht nur so lange, als Temperaturunterschiede vorhanden sind. Nur die dabei auftretende Ausgleichsbewegung kann, wie bei unseren Dampfmaschinen oder Heißluftmotoren, in bestimmte Bahnen geleitet und nutzbar gemacht werden.

Ist diese Molekularbewegung nun ewig, oder kann sie auch einmal erlöschen? Da Wärme und Bewegung gleichbedeutend sind, so müßte durch weitgehende Wärmeentziehung schließlich einmal der Wärmetod, die absolute Bewegungslosigkeit der Atome und Moleküle erreichbar sein. Das geht tatsächlich. Man hat berechnet, daß dieser Wärmetod bei —273° eintritt, denn bei Abkühlung um 1° nimmt der Gasdruck, wenn der Rauminhalt sich gleich bleibt, um den 273. Teil des Druckes ab, den er bei 0° ausübt. Wenn es ein Gas gäbe, das man auf —273° abkühlen könnte, ohne daß es aufhören würde, ein Gas zu sein, so müßte sein Druck gleich Null werden, d. h. die Moleküle würden sämtliche Bewegungsenergie verloren haben. Dies ist der theoretische, absolute Nullpunkt. In Wirklichkeit werden auch die hartnäckigsten Gase vorher flüssig, Sauerstoff z. B. bei —183°, Argon bei — 186°, Stickstoff bei —196°, Wasserstoff bei —252° und Helium bei —267°. Aber auch als Flüssigkeit vermögen die Stoffe ja Wärme abzugeben, und so lange sie dazu imstande sind, zeigen sie damit noch inneres Leben und Bewegung an. Nernst hat in letzter Zeit besonders viele Untersuchungen bei sehr tiefen Temperaturen ausgeführt und dabei zu seiner großen Überraschung gefunden, daß schon mehr oder weniger weit vor dem absoluten Nullpunkt der Wärmeinhalt der Stoffe verschwindend klein wird. Der Kohlenstoff vermag z. B. in seiner kristallisierten Form als Diamant schon bei —231°, also noch 42° über dem absoluten Nullpunkt, keine Wärme mehr abzugeben. Bei anderen Stoffen liegt diese Temperatur bedeutend tiefer; aber alle erleiden früher oder später den „Wärmetod". Eine natürliche und erklärliche Folge des Wärmeverlustes ist eine ständige Abnahme des Rauminhaltes der Stoffe. Ist einmal der Wärmetod eingetreten, so liegen die Moleküle dicht gepackt, tot und starr nebeneinander, eine Zusammenziehung und Abkühlung ist nun nicht mehr möglich. Es ist interessant, daß schon bei gar nicht so tiefen Temperaturen die Stoffe vor Kälte die Fähigkeit verlieren, miteinander chemische Umsetzungen einzugehen. Die Einwirkung von Schwefelsäure auf Natron versagt schon bei —80°; bei —110° vermögen Schwefelsäure und

Salzsäure blaues Lackmuspapier nicht mehr rot zu färben, und unterhalb —135° hört jede chemische Reaktionsfähigkeit bald ganz auf.

Die Wärmebewegung der Gasmoleküle ist oft mit den Bewegungen und Stößen elastischer Billardkugeln verglichen worden, und dieser Vergleich erscheint ganz berechtigt. Wer die Bewegungsgesetze der Billardkugeln kennt, wird sich leicht ein anschauliches Bild z. B. davon machen können, wie die Gasmoleküle sich nach einem Zusammenstoß verhalten. Er weiß, daß die Billardkugeln nach einem Zusammenprall nicht nur geradlinige Bewegungsänderungen erfahren, sondern auch oft in lebhafte, langanhaltende Drehbewegung gesetzt werden. Den Billardspieler würde es sicher interessieren, zu hören, ob das bei den Gasmolekülen auch der Fall ist. Ein dagegen sprechender Grund ist zunächst nicht vorhanden; es fragt sich nur, wie man diese Bewegung nachweisen könnte. Die Frage sieht aus, als ob sie einen in Verlegenheit versetzen könnte; sie ist aber doch leicht zu beantworten und führt uns zu außerordentlich interessanten Verhältnissen.

Zunächst eine ganz einfache Überlegung. Die geradlinige Bewegungsenergie der Gasmoleküle ist ihrer Größe nach meßbar und zwar durch den Druck, den das Gas ausübt, also durch seine Arbeitsfähigkeit. Arbeit aber ist in Wärme verwandelbar und Wärme in Arbeit, das wissen wir auch, und beide stehen in einem ganz bestimmten Zahlenverhältnis zueinander.*) Ich kann also die Arbeitsfähigkeit, die 2 g Wasserstoff bei Erwärmung um 1° (ohne Raumveränderung) infolge der erhöhten geradlinigen Bewegungsenergie der Moleküle erfahren, in Wärmeeinheiten ausdrücken; sie gestattet 1290 g 1 m hoch zu heben und entspricht also 2,98 cal. Nun können wir folgendes voraussagen: wenn wir 2 g Wasserstoff, also sein Molekulargewicht, um 1° erwärmen, ohne daß es sich ausdehnen kann, und die dazu notwendige Wärmemenge messen (sie heißt Molekularwärme), so werden von ihr 2,98 cal. auf die geradlinige Bewegungsenergie der Moleküle kommen und ein eventueller Überschuß auf andere Bewegungszustände. Tatsächlich beträgt die Molekularwärme des Wasserstoffs bei 0° ungefähr 5 cal., bei anderen Stoffen aber mehr oder auch weniger, von 3 cal. anfangend bis hinauf zu 32 cal. und noch mehr.

*) 1 cal. (s. S. 40) ist einer Arbeit gleichwertig, die beim Heben von 430,6 g um 1 cm geleistet wird.

Hier braucht der Naturforscher wieder etwas Phantasie! Denn diese Verschiedenartigkeit der Zahlen so einfach hinzunehmen, das vermag er nicht; er wittert sofort die Möglichkeit, an ihnen in die Tiefe zu klettern und neue Entdeckungen zu machen. Wodurch ist diese Verschiedenheit bedingt? Zunächst ist es doch schon außerordentlich auffällig, daß es Gase gibt, deren Molekularwärme nur 3 cal. beträgt. Das sind in erster Linie die Edelgase Argon, Helium, Xenon und Krypton, dann die Dämpfe von Quecksilber, Natrium usw., kurz Gase, deren Moleküle nur aus einem einzigen Atom bestehen. Das würde also heißen, daß einzelne Atome entgegen unserer Erwartung durch schräge Stöße keine Drehbewegung erhalten können, oder daß, falls sie eine solche etwa schon besitzen, deren Betrag weder vermehrt noch vermindert werden kann. Damit stehen wir ratlos vor einer unvorhergesehenen, prinzipiellen Schwierigkeit. Es ist nur gut, daß wir die Atomtheorie glücklich unter Dach und Fach gebracht haben, sonst würde man sie zunächst wieder für gefährdet halten. Es geht dem Naturforscher, wie es Herakles bei der Bekämpfung der Hydra ging: für jedes gelöste Problem entstehen zwei neue. Ein zweites Problem kommt nämlich noch hinzu. Die Atome verhalten sich bei ihren Zusammenstößen scheinbar wie vollständig elastische Kugeln. Diese Elastizität ist aber ohne Nachgiebigkeit nicht zu denken, so daß die Atome, die wir gefunden haben, weder absolut starr noch unteilbar sein können. Das führt zu dem Schlusse, daß auch die Atome sich noch zusammendrücken lassen, eine Annahme, die z. B. von Richards noch aus anderen Gründen gemacht und experimentell untersucht wird. Auch undurchdringlich können die Atome nicht sein, und Perrin hat gewichtige Gründe dafür ins Feld geführt, daß z. B. die Atome des Wasserstoffs bei 30° sich gegenseitig durchdringen.

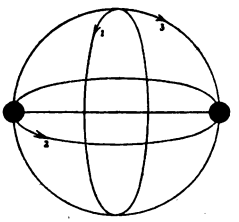


Abb. 41.
Erklärung siehe im Text.

Doch zurück zu den Molekularwärmen! Wenn ein Atom keine Drehbewegung erhalten kann, — wir müssen diese Tatsache zunächst unerklärt hinnehmen, — dann werden sich zwei miteinander fest verbundene Atome um ihre Verbindungslinie aus demselben unbekannten Grunde auch nicht drehen können, so daß solch einem Molekül nur noch zwei von den drei Hauptdrehrichtungen übrig bleiben. In

Abb. 41 sollen die zwei schwarzen Punkte die Mittelpunkte der Atome andeuten, und die Kreise die Hauptdrehrichtungen des Moleküls. 1 ist ausgeschaltet; es stehen dem Molekül also nur noch die Richtungen 2 und 3 zur Verfügung. Boltzmann, der all diese Möglichkeiten weitgehend durchdacht hat, nimmt zunächst an, daß bei der Erwärmung normalerweise auf die Drehbewegung derselbe Energieanteil fallen müßte, wie auf die gradlinige Fortbewegung, das wären auch 3 cal. Ist eine Drehrichtung ausgeschaltet, so würde für die Drehbewegung ein Drittel weniger, also nur 2 cal. in Betracht kommen, so daß die Molekularwärme zweiatomiger Gase 3+2=5 cal. betragen müßte. Tatsächlich ist diese Molekularwärme z. B. beim Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Kohlenoxyd und der Salzsäure festgestellt worden. Sind im Molekül drei und mehr Atome vorhanden, so ist die Drehbewegung unbeschränkt, und das Gas müßte normalerweise eine Molekularwärme von 6 cal. besitzen. Dies ist bei dem dreiatomigen Wasserdampf auch der Fall.

Diese Berechnungen stimmen natürlich nur dann, wenn die Atome so fest miteinander verbunden sind, daß sie nur gemeinsame Bewegungen ausführen können. Ist ihr Zusammenhang gelockert, so werden sie bei einem Zusammenprall auch in selbständige Schwingungen versetzt, was eine Steigerung der Molekularwärme über 6 cal. hinaus mit sich bringen müßte. In der Tat liegt die Molekularwärme bei einigen zweiatomigen Gasen, z. B. bei Brom und Jod, deren Moleküle bei höheren Temperaturen ganz aus dem Verband gehen (das Jod ist schon bei 1500° vollständig in Atome aufgelöst), schon über 6 cal. Die Molekularwärme des zersetzlichen Azetylens beträgt, um noch einige Beispiele anzuführen, 8, die des Schwefelkohlenstoffs 10, die des Chloroforms 15, die des Äthers 32 cal. Die Atomlockerung, die durch diese Zahlen verraten wird, muß mit der Temperatur steigen, und mit ihr dann auch wieder die Molekularwärme. Dabei werden die Eigenbewegungen der Atome mit steigender Temperatur derart erhöht, daß sie schließlich die Anziehungskräfte, die das Molekül zusammenhalten, überwinden und das Molekül sprengen. Dieser Vorgang, Dissoziation der Gase genannt, verbraucht für sich auch wieder Wärme, genau so wie die Verdampfung einer Flüssigkeit. Dadurch wird die Molekularwärme noch wieder erhöht. Sie steigt beim Wasserdampf z. B. von 5,93 bei 0° auf 21,1 bei 2000°. Bei 1000° beginnt der Wasserdampf auch schon in Wasser-

stoff und Sauerstoff zu zerfallen, und bei 2500° hat sich diese Zersetzung, die mit steigender Temperatur einen immer größeren Anteil ergreift, auf die Hälfte der Moleküle ausgedehnt. Der entstehende Wasserstoff und Sauerstoff bilden zunächst für sich Moleküle, die bei diesen Temperaturen noch beständig sind. Weiter hinauf aber werden auch sie durch die Atombewegung gesprengt. Das verrät schon die außerordentlich hohe Steigerung der Molekularwärme des Wasserstoffs bei ganz hohen Temperaturen; tatsäch-

Abb. 42. Teichmannsche Häminkristalle im polarisierten Lichte. Je nach Lage der Kristalle zur Schwingungsrichtung des Nicols erscheinen sie teils hell, teils dunkel. Die Bezifferung des Maßstabs gibt ohne weiteres Mikromillimeter (μ) an. Vergrößerung 450 lin.

lich ist der Wasserstoff auch bei 5000° ziemlich vollständig in Atome zerfallen. So erhalten wir durch die bloße Messung der spezifischen Wärme eines Gases einen tiefen Einblick in das Leben seiner Moleküle, und wenn man sich mit diesen Fragen eingehend beschäftigt, so kann man noch viel mehr herauslesen.

Bei den tropfbaren Flüssigkeiten sind die Verhältnisse infolge der geringen Abstände der Moleküle und ihrer Anziehungskräfte, die sich dabei schon geltend machen und z. B. in der Oberflächenspannung zum Ausdruck kommen, derart verwickelt, daß sie für uns noch

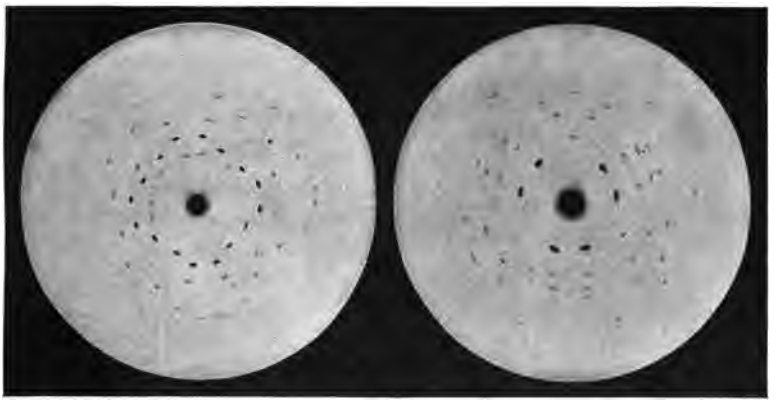
ganz undurchsichtig sind. Aber auf dem Gebiet der Lösungen, und zwar der kolloidalen, hat Perrin eine wunderhübsche experimentelle Bestätigung dieser ganzen Überlegungen gefunden. Man kann sich vorstellen, daß aus der Energie der Drehbewegung bei einer bestimmten Temperatur sich Schlüsse auf die Schwere der einzelnen Moleküle und die berühmte Zahl N ziehen lassen. Derartige theoretische Berechnungen hat Einstein durchgeführt. Perrin nun hat sehr große Moleküle seiner kolloidalen Lösungen hergenommen, die sich ja wie Gasmoleküle verhalten, und nach derartigen Drehbewegungen unter dem Mikroskop gefahndet. Sie sind unter diesen schwierigen Verhältnissen natürlich nur zu sehen, wenn solch ein Riesenmolekül irgendeine Unregelmäßigkeit aufweist. Perrin hat die Drehbewegung wirklich beobachten und sogar messen können und hat daraus annähernd dieselbe Zahl für N gefunden, die wir schon kennen. Mehr kann man sicher nicht verlangen!

Bei den festen Körpern treten wieder übersichtlichere und insofern sehr bemerkenswerte Verhältnisse ein, als hier die Moleküle ihre Rolle ausgespielt haben und nur noch Atombewegungen stattfinden. Wir schließen das daraus, daß zunächst die Atomwärmen aller festen Elemente ungefähr gleich groß sind (sie liegen der Zahl 6 nahe), und auch in ihrer charakteristischen Größe in sämtlichen Verbindungen bestehen bleiben, so daß die Molekularwärme eines festen Stoffes genau die Summe seiner Atomwärmen ist. Auch diejenigen Atomwärmen, die von der Durchschnittsgröße mehr oder weniger abweichen, treten in den zusammengesetzten Molekülen unverändert wieder auf. Wir müssen uns also in den festen Stoffen die Moleküle ziemlich nahe aneinandergepackt und durch Anziehungskräfte oder sonstwie in ihrer Bewegungsfähigkeit gehindert denken, so daß im wesentlichen nur noch die Atome Schwingungen um ihre Gleichgewichtslage ausführen können.

Dabei gruppieren sich die Moleküle zu den charakteristischen Formen der Kristalle, in denen sich gleichsam die Eigenart jedes Moleküls durch eine persönliche Note zu erkennen gibt. Wenn wir die so eigenartigen, regelmäßigen Formen des Kupfersulfats, der Weinsäurekristalle (s. S. 50), des Bergkristalls, des Kalkspats ansehen, oder Eiweißkristalle von Blutkörperchen (Abb. 42), deren Gestalt immer verrät, von welchem Tier das Blut stammt, so könnte man leicht auf den Gedanken kommen, daß die Moleküle dieselbe Form wie die

Kristalle haben müßten. Das ist aber durchaus nicht notwendig und auch nicht der Fall; denn derselbe Stoff vermag oft in äußerlich recht verschiedenen Formen zu kristallisieren. Über die wirkliche Gestalt der Moleküle wissen wir tatsächlich noch nichts; ebensowenig über die der Atome. Richards nimmt sogar an, daß die Atome sich bei der Aneinanderlagerung zu Molekülen gegenseitig eindrücken, so daß ihre Form von Fall zu Fall verschieden wäre. Hier hat die Phantasie und die Forschung ein reiches Feld der Betätigung.

Aber unter der Voraussetzung einer ganz bestimmten und für jede Kristallart bestimmten Regelmäßigkeit in der Anordnung



a b

Abb. 43. Interferenzfiguren, die bei Durchleuchtung eines Zinkblendekristalls erhalten wurden.

der Moleküle, bei der deren wirkliche Gestalt durchaus nicht gleichgültig zu sein braucht, sind in allerletzter Zeit äußerst interessante Versuche ausgedacht und ausgeführt worden, und zwar von Laue und seinen Mitarbeitern. Bekannt ist die Anzahl von Molekülen, die in einer bestimmten Gewichtsmenge eines Stoffes enthalten sind. Darauf fußend rechnete Laue den Raum aus, der auf ein einzelnes Molekül eines bestimmten Kristalls, z. B. des Zinksulfids, der Zinkblende kommt, und berechnete daraus den Durchmesser der Moleküle. Die Rechnung ergab, daß er ungefähr $3{,}3 \cdot 10^{-8}$ cm betragen müsse.*) Nun hatte man schon lange vermutet, daß die Röntgenstrahlen sich wie Lichtschwingungen verhielten,

*) Man vergleiche mit dieser Zahl die Dicke der dünnsten Ölschicht auf Wasser, S. 55.

deren Wellenlänge nur außergewöhnlich klein ist; ungefähr 2.10^{-8} bis 1.10^{-9} cm gegen 4.10^{-5} cm des violetten Lichtes, also mindestens tausendmal so klein wie dessen Wellenlänge. Die Größenordnung ist aber dieselbe wie der Durchmesser eines Moleküls im Zinksulfidkristall. Laue sagte sich deshalb, wenn beide Annahmen und Berechnungen stimmen, und wenn die räumliche Verteilung der Moleküle der Zinkblende die vorausgesetzte ist, so müßte man bei richtiger Belichtung eines zu diesem Zwecke aus dem Kristall herausgeschnittenen Kristallplättchens mit Röntgenstrahlen ganz bestimmte Beugungserscheinungen dieses Röntgenlichtes, bestimmte Interferenzfiguren, erhalten. Bei engen Spalten sind die Interferenzfiguren schmale Lichtstreifen (s. S. 58). In dem vorliegenden Fall werden die Interferenzbilder punktförmig sein und eine für jede Kristallart verschiedene Anordnung aufweisen. Diese Interferenzbilder kann unser Auge natürlich nicht wahrnehmen, wohl aber vermag es die photographische Platte. Der Versuch, dessen Ausführung, wie man sich denken kann, nicht ganz leicht ist, wurde mit 0,5 Millimeter dicken Kristallschliffen ausgeführt, und — das Ergebnis gab den Vermutungen recht. Man erhielt außerordentlich interessante, für jede Kristallart charakteristische Interferenzbilder, von denen zwei in Abb. 43 wiedergegeben sind. Sie sind bei der Bestrahlung der Zinkblende erhalten worden. Die Strahlen trafen bei Abb. a senkrecht auf eine Würfelfläche, bei Abb. b senkrecht auf eine Oktaederfläche auf. Die Anordnung der Interferenzpunkte entspricht durchaus den gehegten Erwartungen. Ob nun auch die Röntgenstrahlen wirklich Lichtschwingungen sind, diese Voraussetzung ist durch den Versuch noch nicht bewiesen. Wir wissen, daß jedes Atom, das von Röntgen-

Abb. 44. Perrin.

strahlen getroffen wird, zu einer Eigenstrahlung erregt wird, und diese Eigenstrahlungen werden ganz wesentlich an der Bildung der Interferenzfiguren beteiligt sein. Über diese Frage können nur weitere Versuche Klarheit schaffen. Eines aber ist sicher erreicht: die Molekularstruktur der Kristalle kann auf photographischem Wege sichtbar gemacht werden, und ihre Veränderung unter den verschiedensten Einflüssen ist der experimentellen Beobachtung zugänglich geworden.

Lang und mühsam war der Weg, den die Forscher in unverdrossener Arbeit zum Reich der Atome und Moleküle zurückgelegt und den wir hier in aller Kürze überblickt haben. So einfach, das sahen wir, wie Demokrit, Epikur und Lukrez sich das Weltbild aus Atomen formten, ist es in Wirklichkeit nicht. Mit philosophisch kühnem Griff kann man es nicht enträtseln. In hartem Ringen muß Geschlecht auf Geschlecht Stein um Stein in praktischer Arbeit heranschaffen, damit wir den Bau des Weltalls in Gedanken nachbilden können. Wir durchschauen jetzt auch den Widerstand, den viele Philosophen gegen die Annahme von Atomen geleistet. Er war eigentlich immer gegen die atomistische Weltanschauung der Alten gerichtet, gegen den Begriff des Atoms, den die alten Philosophen sich zurechtgemacht hatten. Dieser Atombegriff war, darüber besteht kein Zweifel, voll innerer Widersprüche. Von ihm sind die Atome des Chemikers grundverschieden und haben mit ihm eigentlich nur eines gemeinsam: sie lösen unsere Welt auf in für sich bestehende, selbständige, voneinander gesonderte, für uns unsichtbare Bestandteile. Wir haben ihre Herausarbeitung verfolgt und gesehen, wie die Forscher vorsichtig den Atomen und Molekülen immer nur solche Eigenschaften zuschrieben, auf die das physikalische oder chemische Verhalten der Stoffe hinführte, so z. B. die Gleichartigkeit der Atome eines Elementes, die Fähigkeit verschiedener Atome, sich in feststehender Anzahl miteinander zu vereinigen, die Wärmebewegung u. a. Undurchdringlichkeit und Unteilbarkeit dagegen waren Fragen, über die lange Zeit nichts Sicheres auszusagen war; nur soviel konnte man sagen, daß, wenn Atome teilbar sind, dann mit der Aufspaltung der Atome auch der betreffende Stoff als solcher verschwindet, und etwas ganz Neues an seiner Stelle erscheint. Jetzt sind wir auch experimentell so weit gekommen, um zu diesen Fragen Stellung nehmen zu können, und da haben sich die Anzeichen dafür

gehäuft, daß unsere Atome wirklich zusammendrückbar und auch noch weiter teilbar sind. So mußte langsam ein Einwand nach dem anderen, den man gegen das Dasein von Atomen gemacht, hinfällig werden. Auch die ganz gefühlsmäßige Abneigung gegen die Annahme unsichtbarer Teilchen, die früher viele in ihrer Stellungnahme bestimmt haben mag, ist inzwischen sicher besiegt worden, nachdem uns so wunderbare Apparate wie das Mikroskop und das Ultramikroskop neue, bis dahin unbekannte Welten erschlossen und uns von der Unzulänglichkeit unserer uns angeborenen Sinne überzeugt haben. Nehmen wir dann noch zuguterletzt die materiellen und zahlenmäßigen Beweise der letzten Zeit für das Vorhandensein der Moleküle und Atome, so können wir sagen: Von derselben Wirklichkeit, wie die uns umgebenden Körper, wie z. B. mein Haus, wie die Steine, aus denen es gefügt, wie die Kristalle, aus denen die Steine zusammengesetzt sind, von derselben Wirklichkeit sind auch die Moleküle, die sich zu dem Kunstbau der Kristalle vereinigen und die Atome, die jene Moleküle aufbauen; wir können sagen: **Die Atome und Moleküle sind wirklich bestehende Bausteine des Weltalls.**

Welche Unendlichkeiten hat die naturwissenschaftliche Forschung unseren staunenden Augen erschlossen: Der Lichtstrahl, der nach jahrtausendlanger Reise durch den Weltenraum gerade noch stark genug ist, unserer photographischen Platte die Existenz eines weltenfernen Fixsterns zu verraten, ehe er vor Erschöpfung ganz erlischt, muß uns erzählen, aus welchen Stoffen der Stern aufgebaut ist, der ihn als Boten hinausgesandt hat. Er berichtet uns, daß er aus denselben Stoffen, denselben Atomen und Molekülen besteht, wie unsere Erde. Mit ihnen aber tauchen wir aus der Welt des unendlich Großen in die des unendlich Kleinen. Nicht Giganten sind es, die unseren Erdball formen, die Gebirge auftürmen, sondern winzige Zwerge; **aber in der Vereinigung entwickeln sie Gigantenkräfte.** Sie sind es und keine Götter, wie in den alten griechischen Sagen, die die ungeheure Glut der Vulkane schüren; sie stürmen in Zyklonen mit einer Gewalt einher, die Städte und Länder verwüstet; sie steigen im Wasserdampf aus den Seen und Meeren empor, um als Regen niederzufallen; in Bächen und Strömen zum Meere eilend, graben sie Runzeln in das alternde Antlitz der Erde; sie kreisen in den flackernden Lebensflammen, die auf unserem Erdstern brennen, sie strömen in buntem Verein als Blut durch unsere Adern, sie zittern in den Gedanken unseres Hirns.

Sind mit dieser Erkenntnis nun die Rätsel des Weltalls gelöst? Nein, sie sind uns fremd wie zuvor, nur etwas heller ist es geworden; der Weg zu ihnen ist gewiesen; wir wissen jetzt, wo sie zu suchen sind, wenn wir sie bewältigen wollen.

Wir kennen haarscharf die Gesetze, nach denen die Gestirne sich bewegen und der Stein zur Erde fällt; aber niemand wird behaupten, daß wir die Ursache kennen — Ursache ist ein schlechtes Wort —, die die Erde in ihrer Bahn um die Sonne hält oder den kleinsten Kieselstein zur Erde zieht — oder drückt? Kein Mensch weiß, was die Schwerkraft eigentlich ist.

Wir haben die Gesetze erforscht, nach denen die Atome sich zu Molekülen verbinden. Unsere Chemiker können neue, noch nie dagewesene Stoffe herstellen; sie können neue Moleküle künstlich und ganz bewußt aufbauen; sie konnten es schon lange, ehe das Dasein der Atome und Moleküle sicher bewiesen war. Trotzdem aber wissen wir noch nicht sicher, was die Atome und Moleküle zueinander zieht und aneinander kettet, von welchen Kräften sie zu der gesetzmäßigen Form der Kristalle gerichtet werden, oder nach welchen Gesetzen sie sich zu dem organischen Bau einer Pflanze, zu einem Tiere zusammenfügen. Wie die Geschlechter und Arten der Lebewesen, so haben auch die ihnen eigentümlichen Stoffe ihre Geschichte; hat doch jede Tierart — vielleicht sogar jedes Individuum — ihr charakteristisches Eiweiß, das mit ihr entstanden ist, sich mit ihr verändert und mit ihr zugrunde geht. So haben auch die verschiedenen Molekülarten ihre noch ungeschriebene Geschichte; nur die der künstlichen wird nach dem Datum der Bildung und dem Namen der Hersteller in den Annalen der chemischen Wissenschaft genau vermerkt. Und schon taucht das Problem des Baues der Atome vor uns auf, das große Rätsel eines gemeinsamen Urstoffs mit „Uratomen".

Vielleicht verstehen wir später einmal den geheimen Sinn, nach dem sich die Gesetzmäßigkeit des periodischen Systems der Elemente ordnet, weshalb gerade die vorhandenen Elemente und Atomarten und nicht doppelt oder dreimal so viel existieren. Vorläufig ist jedes Element mit seinen Atomen noch eine Welt für sich, unüberbrückbar geschieden von jedem anderen. Vielleicht dringt auch hier eines Tages Licht in das Dunkel, vielleicht enträtselt einst ein Forscher die Entwicklungsgeschichte der Atome.

So reisen wir dahin über Irrtum und Wahrheit zu neuer, reicherer Erkenntnis.

Namen- und Sachregister.

Die mit einem Sternchen (*) bezeichneten Ziffern verweisen auf eine Abbildung im Text.

Alchimist 14
Ampère 26, 31
Arrhenius 37
Asymmetrisches Kohlenstoffatom 49*
Atom 9, 23
Atomgewicht, relatives, 25, 41, 42
—, absolutes, 78, 82
Atomwärme 40, 94
Avogadro 26, 31
Boyle 16*, 27
Brown'sche Molekularbewegung 68, 69*, 70*
Chemischer Vorgang 18
Demokrit 6*, 7
Dalton 23*, 29
Einstein 94
Element 19, 20
Epikur 7*
Fischer, E., 50, 53
Fluoreszëin 56
Gasgesetze 27, 28
Gaede 86
Gassendi 15
Gay-Lussac 30
Gefrierpunktserniedrigung 37
Goldschlägerhaut 54
Grammmolekül 35
Interferenz 58, 95*, 96
Kant 6
Kardioidkondensator 63*, 64
Kolloidale Lösung 66
Konstitutionsformel 46*
Lackmus 33
Lackmusseide 52
Laue 95
Lavoisier 18, 19*
Le Bel 48
Leukipp 7
Lukrez 7
Mendelejeff 43
Meyer 43
Mikroskop 57
Mikrowage 54
Molekül 24
Molekulargewicht, relatives, 32, 36
—, absolutes, 78, 82
Molekularluftpumpe 85*, 86, 87
Molekularwärme 90, 92, 94
Nernst 89
Oberflächenspannung 39*
Ölhaut 55
Osmotischer Druck 35*
Paraboloidkondensator 63*, 64
Pasteur 50
Periodisches System 42
Perrin 74, 94, 96*
Polarisiertes Licht 47
Raoult 36
Rayleigh 79
Röntgenstrahlen 95, 96
Schopenhauer 6
Siedentopf 62*, 63
Siedepunktserhöhung 37
Spiegelbildisomerie 49*, 50*
Svedberg 71, 72*, 80
Van't Hoff 36, 37*, 48
Wärme 29, 88, 89
Weinsäurekristalle 50*
Wertigkeit 45
Ultramikroskop 61*, 63
Zsigmondy 59*, 60

Wichtigste Literatur.

Dannemann, Fr., Die Naturwissenschaften in ihrer Entwicklung und ihrem Zusammenhang. 4 Bde. Dritter Bd. Leipzig, 1911.

Friedrich, W., P. Knipping und M. Laue, Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen. Sitzungsberichte der mathem.-physikal. Klasse der K. B. Akademie der Wissenschaften zu München, 1912, S. 323.

Gaede, W., Die Molekularluftpumpe. Annalen der Physik. Vierte Folge, Bd. 41 (1913), S. 337.

Graebe, C., Der Entwicklungsgang der Avogadro'schen Theorie. Journal für praktische Chemie. Neue Folge, Bd. 87 (1913), S. 148—208.

Lange, F. A., Geschichte des Materialismus und Kritik seiner Bedeutung in der Gegenwart. 6. Aufl. 2 Bde., 1898.

Lucretius Carus, Von der Natur der Dinge. Übersetzt von Karl Ludwig von Knebel. Reclam.

Nernst, Dr. Walter, Theoretische Chemie vom Standpunkt der Avogadro'schen Regel und der Thermodynamik. Stuttgart 1913.

Perrin, Jean, Die Brown'sche Bewegung und die wahre Existenz der Moleküle. Kolloidchemische Beihefte (Ergänzungsheft zur Kolloid-Zeitschrift), Bd. 1, S. 221.

The Svedberg, Die Existenz der Moleküle. Experimentelle Studien. Leipzig 1912.

Zsigmondy, Richard, Zur Erkenntnis der Kolloide. Jena 1905.

—„—, Kolloidchemie, ein Lehrbuch. Leipzig 1912.

Naturwissenschaftliche Bildung ist die Forderung des Tages!

Zum Beitritt in den „Kosmos, Gesellschaft der Naturfreunde", laden wir

alle Naturfreunde

jeden Standes, sowie alle Schulen, Volksbüchereien, Vereine usw. ein. — Außer dem geringen

Jahresbeitrag von nur M 4.80

(Beim Bezug durch den Buchhandel 20 Pf. Bestellgeld, durch die Post Porto besonders.)

= K 5.80 h ö. W. = Frs 6.40 erwachsen dem Mitglied **keinerlei** Verpflichtungen, dagegen werden ihm folgende große Vorteile geboten:

Die Mitglieder erhalten laut § 5 als Gegenleistung für ihren Jahresbeitrag im Jahre 1913 **kostenlos:**

I. Die Monatschrift Kosmos, Handweiser für Naturfreunde. Reich illustr. Mit mehreren Beiblättern (siehe S. 3 des Prospektes). Preis für Nichtmitglieder M 2.80.

II. Die ordentlichen Veröffentlichungen.

Nichtmitglieder zahlen den Einzelpreis von M 1.— pro Band.

Dr. H. Dekker, Vom sieghaften Zellenstaat.
Dr. Ad. Koelsch, Der blühende See.
W. Boelsche, Festländer und Meere.
Dr. K. Floericke, Einheimische Fische.
Dr. A. Zart, Atome, Moleküle und andere naturwissenschaftliche Hypothesen.

Änderungen vorbehalten. (Näheres wird im Kosmos-Handweiser bekanntgegeben.)

III. Vergünstigungen beim Bezuge von hervorragenden naturwissenschaftlichen Werken (siehe Seite 6 des Prospektes).

☛ Jede Buchhandlung nimmt Beitrittserklärungen entgegen und besorgt die Zusendung. Gegebenenfalls wende man sich an die Geschäftsstelle des Kosmos in Stuttgart

Jedermann kann jederzeit Mitglied werden.
Bereits Erschienenes wird nachgeliefert.

Satzung

§ 1. Die Gesellschaft Kosmos (eine freie Vereinigung der Naturfreunde auf geschäftlicher Grundlage) will in erster Linie die Kenntnis der Naturwissenschaften und damit die Freude an der Natur und das Verständnis ihrer Erscheinungen in den weitesten Kreisen unseres Volkes verbreiten.

§ 2. Dieses Ziel sucht die Gesellschaft zu erreichen: durch die Herausgabe eines den Mitgliedern **kostenlos** zur Verfügung gestellten naturwissenschaftlichen Handweisers (§ 5); durch Herausgabe neuer, von hervorragenden Autoren verfaßter, im guten Sinne gemeinverständlicher Werke naturwissenschaftlichen Inhalts, die sie ihren Mitgliedern **unentgeltlich** oder zu **einem besonders billigen Preise** zugänglich macht, usw.

§ 3. Die Gründer der Gesellschaft bilden den geschäftsführenden Ausschuß, den Vorstand usw.

§ 4. **Mitglied kann jeder werden**, der sich zu einem Jahresbeitrag von M 4.80 = K 5.80 h ö. W. = Frs 6.40 (exkl. Porto) verpflichtet. Andere Verpflichtungen und Rechte, als in dieser Satzung angegeben sind, erwachsen den Mitgliedern nicht. Der Eintritt kann jederzeit erfolgen; bereits Erschienenes wird nachgeliefert. Der Austritt ist gegebenenfalls bis 1. Oktober des Jahres anzuzeigen, womit alle weiteren Ansprüche an die Gesellschaft erlöschen.

§ 5. Siehe vorige Seite.

§ 6. Die Geschäftsstelle befindet sich bei der **Franckh'schen Verlagshandlung, Stuttgart**, Pfizerstraße 5. Alle Zuschriften, Sendungen und Zahlungen (vgl. § 5) sind, soweit sie nicht durch eine Buchhandlung Erledigung finden konnten, dahin zu richten.

Kosmos

Handweiser für Naturfreunde

Erscheint jährlich zwölfmal – 2 bis 3 Bogen stark – und enthält:

Originalaufsätze von allgemeinem Interesse aus sämtlichen Gebieten der Naturwissenschaften. Reich illustriert.

Regelmäßig orientierende Berichte über Fortschritte und neue Forschungen auf allen Gebieten der Naturwissenschaft.

Auskunftsstelle – Interessante kleine Mitteilungen.

Mitteilungen über Naturbeobachtungen, Vorschläge und Anfragen aus dem Leserkreise.

Bibliographische Notizen über bemerkenswerte neue Erscheinungen der deutschen naturwissenschaftlichen Literatur.

Der Handweiser mit seinen illustr. Beiblättern:

Wandern und Reisen / Aus Wald und Heide / Photographie und Naturwissenschaft / Technik und Naturwissenschaft / Haus, Garten und Feld / Die Natur in der Kunst / Natur und Heimatschutz / / / / /

kostet für Nichtmitglieder ohne Buchbeilage jährlich M. 2.80
Probehefte durch jede Buchhandlung oder direkt.

Vom sieghaften Zellenstaat

von

Dr. Hermann Dekker

Mit zahlreichen Abbildungen

**Für Nichtmitglieder: In farbigem Umschlag geheftet M 1.—
In Leinen gebunden M 1.80**

Pflanze, Tier, Mensch, alles Lebendige ist aufgebaut aus winzig kleinen, aber doch mit dem Mikroskop gut erkennbaren lebendigen Bausteinen, den sogenannten Zellen. Jede Zelle lebt für sich, nährt sich und atmet und entfaltet ihre Tätigkeit. Aber das Lebewesen selbst ist nicht einfach die Gesamtsumme der Zellen, das Leben nicht einfach die Summe der Zellentätigkeiten. Ein geheimnisvolles Rätsel ist es, wie alle diese Zellen sich zum Ganzen, zum Zellenstaat zusammenschließen, zu Ordnung und Harmonie. Ein Rätsel, wie sich die Zellen dem Ganzen und höheren Zwecken unterordnen, wie sie zum Wohle des ganzen Zellenstaates zusammenwirken, Hand in Hand arbeiten, harmonisch sich mit ihren Leistungen ineinanderpassen und je nach den Bedürfnissen des Augenblickes arbeiten und ruhen, ihre Aufgaben und Leistungen ändern. Nur dann, wenn unsere Organe vor schweren Leistungen versagen, wenn das Zusammenspiel der Zellen gestört ist, wenn unser Körper nicht so kann, wie er will, und wie wir müssen, werden wir daran erinnert, wie sehr wir von den Lebensleistungen abhängig sind, die sich im Innern abspielen. Tagtäglich aber erhält unsere Zellentätigkeit in tausend schwierigen Lagen unseren Leib gesund und lebendig, tagtäglich finden sich die Zellen schlagfertig mit den Schwierigkeiten des Lebens ab und überwinden in uns sinnreich erscheinender Weise Tod und Gefahren. Sieghaft hilft uns unser Zellenstaat über die Stürme des Lebens hinweg.

Festländer und Meere

im Wechsel der Zeiten

von

Wilhelm Boelsche

Mit vielen hochinteress. Bildern

Für Nichtmitglieder: In farbigem Umschlag geheftet M 1.—
In Leinwand gebunden M 1.80

Helgoländer Küste.

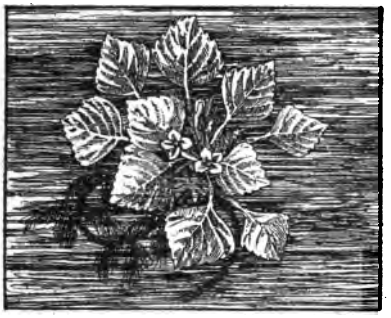
Zu den ältesten Fragen des erwachenden Menschengeistes gehört die nach der Verteilung von Wasser und Land in der Vergangenheit. — Warum liegen heute Muscheln hoch auf dem trockenen Lande? Warum rauscht die Welle des Ozeans umgekehrt über Strecken, wo die Überlieferung noch von menschlichen Wohnstätten weiß? Ist es denkbar, daß die Wasser einst über die Berge gingen, oder der Abgrund der heutigen See trockenen Fußes zu durchwandern war? Von dem Grübeln über diese Dinge zeugen die Sintflutsagen der Völker. Es ist so: Im Verlauf der vielen Millionen von Jahren, die diese Erdgeschichte umfaßt, haben auf unserem Planeten Festland und Wasserbedeckung unablässig gewechselt. Und von diesem großen Lied des Werdens und Vergehens, an das unsere eigene Menschheitsentwicklung so eng angeschlossen gewesen ist, erzählt dieser Band. In farbigen Bildern malt er die uralten Festländer und Küsten des Nordens, das wunderbare verschollene Gondwanaland im Süden, die später zerstörten Brücken zwischen heutigen Kontinenten; er berichtet von den Sintflut- und Atlantislegenden und ihrem Wahrheitskern, von den Korallenriffen der Vorzeit, die heute Gebirge sind, von den Quellen der Tiefe und von den Zukunftsschicksalen des Wassers und damit des Lebens auf der Erde. — Im engen Rahmen entfaltet sich vor dem Leser ein Stück praktischer Geologie, während zugleich das heutige geographische Kartenbild der Erde eine neue und überraschende Deutung findet.

Der blühende See

Von **Dr. Adolf Koelsch**

Mit zahlreichen Abbildungen

Für Nichtmitglieder: In farbigem Umschlag geh. M 1.— In Leinen gebunden M 1.80



Wassernuß.

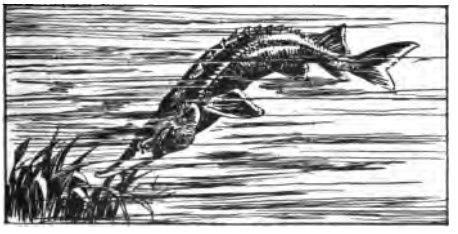
In den Tiefen des Wassers ist nach allem, was wir wissen und ahnen können, das Leben entstanden. Von hier aus eroberte es sich in silurischen oder gar schon in kambrischen Zeiten das feste Land, und hier sind auch die ersten Blütenpflanzen entstanden. Aber es scheint, daß jede Lebenseinheit, die vom Festland herangebracht wurde, immer einmal wieder die Rückwanderung antreten muß zu der Stätte, wo das erste Lebensflämmchen aufglomm. Der „Blühende See" erzählt von den diesbezügl. Beobachtungen bei den Blütenpflanzen.

Luftatmende, hochgeborene Pflanzen verwandeln sich wieder zurück in Kiemen atmende Lurche; wir erleben den Abstieg und hören von den tausendfältigen Neuanpassungen, die er nötig macht. Außer der Lebensgeschichte einzelner Gestalten empfangen wir aber auch eine lebendige Schilderung der sozialen Gliederung des gesamten Schwimm- und Tauchpflanzenstaates, lernen seine nächsten Angrenzer an den Strandstreifen der Seen kennen, erfahren von Wesen mit seltsamen Doppelleben zu Wasser und Land und wie der See sich immer wieder neuen Zugang holt an der Küste.

Einheimische Fische

Von **Dr. Kurt Floericke**

Mit zahlreichen Abbildungen / / **Für Nichtmitglieder: In farbigem Umschlag geh. M. 1.—. In Leinen geb. M 1.80**



Sterlet.

Nachdem der bekannte Autor in seinen früheren Bändchen die vier ersten Stämme des Wirbeltierreiches behandelt hat, geht er jetzt dazu über, auch den letzten, die Fische, in seiner packenden gemeinverständlichen Art vorzuführen. Besonders geht der Verfasser auch auf die Organisation und das Sinnesvermögen der Fische ein, ohne jedoch den praktischen Teil, wie Fischzucht und Fischfang, zu vernachlässigen. Auf den beigegebenen Abbildungen gelangt der interessanteste Teil der einheimischen Fischarten zur Darstellung.

Bausteine des Weltalls

Atome und Moleküle

Von Dr. A. Zart — Mit vielen Bildern

Für Nichtmitglieder: In farbigem Umschlag geheftet M 1.—
In Leinwand gebunden M 1.80.

In ein heißumstrittenes Gebiet geleitet uns dieses Bändchen, das in leicht verständlicher und fesselnder Weise den Leser in die rätselhafte Welt der Atome und Moleküle einführt. Diese winzigen Gebilde, die früher nur als ein Hirngespinst vereinzelter philosophischer Grübler galten, sind heute nicht nur als die unentbehrlichen Bausteine des stolzen Gebäudes einer zwar noch jugendlichen, aber schon ganz unentbehrlichen Wissenschaft, der Chemie, erkannt, sondern auch als die tatsächlich vorhandenen Bausteine der gesamten körperlichen Welt. Es wird gezeigt, wie schon die aufmerksame Beobachtung und Deutung alltäglicher Vorgänge selbst den Ungelehrten auf ihre Spur führt, und weiterhin berichtet, wie die Wissenschaft in langem und hartem Ringen des Problems Herr geworden ist. Ja, diese hat es sogar verstanden, die Atome und Moleküle nicht nur zu messen und zu wägen, sondern die Geheimnisvollen auch in das Licht sinnlicher Wahrnehmung zu rücken. Wenn dann zum Schluß dargetan wird, welch überaus wichtige Rolle diese winzigen Körperchen in unserer Welt und auch in uns selber spielen, so fehlt doch auch der nachdrückliche Hinweis nicht, daß mit ihrer Erforschung noch lange nicht die Rätsel dieser Welt und unseres Lebens gelöst sind, sondern mit dieser Erkenntnis nur der Weg zu neuen und noch tieferen Problemen freigelegt wurde. Es bildet für jeden Denkenden einen hohen geistigen Genuß mit den so einleuchtend geschilderten Fortschritten der physikalischen und chemischen Forschung bekannt gemacht zu werden, die in jüngster Zeit eine völlige Umwälzung der naturwissenschaftlichen Atomtheorie herbeigeführt haben.

Die Mitglieder des Kosmos haben bekanntlich nach Paragraph 5III das Recht, außerordentliche Veröffentlichungen und die den Mitgliedern angebotenen Bücher zu einem Ausnahmepreis zu beziehen. Es befinden sich u. a. darunter folgende Werke:

	Preis f. Nichtmitgl.	Mitgliederpreis
	ℳ	ℳ
Altpeter, ABC der Chemie	2.40	1.—
Bergmiller, Erfahr. a. d. Gebiete d. hoh. Jagd. Geb.	4.50	3.50
Bölsche, W., Der Sieg des Lebens. Fein gebunden	1.80	1.50
Diezels Erfahrungen a. d. Gebiete der Niederjagd. Geb.	4.50	2.90
Ewald, Mutter Natur erzählt, Gebunden	4.80	3.60
„ **Der Zweifüßler.** Gebunden	4.80	3.60
Fabre, J. H., Sternhimmel. Gebunden	4.80	3.60
„ **Bilder aus der Insektenwelt.** I./II. Reihe. Geb.	4.50	3.40
„ **Blick ins Käferleben.** Broschiert	1.—	—.50
Floericke, Dr. Kurt, Deutsches Vogelbuch. Gebunden	10.—	8.40
Floericke, Taschenbuch zum Vogelbestimmen. Geb.	3.80	2.90
Frnwirth, Die Pflanzen der Feldwirtschaft. Geb. .	3.80	2.90
Gräbner, Taschenbuch zum Pflanzenbestimmen. Geb.	3.80	2.90
Hepner, Cl., 100 neue Tiergeschichten. Gebunden .	3.60	2.80
Jaeger Prof. Dr. Gust., Das Leben im Wasser. Kart.	4.50	1.70
Kuhlmann, Wunderwelt des Wassertropfens. Brosch.	1.—	—.50
Lange, Der Garten und seine Bepflanzung. Geb.	4.50	3.50
Leben der Pflanze. Bd. I, II, III. IV, V, VI, geb. je	15.—	13.50
Lindemann, Die Erde. Bd. I. Gebunden	9.—	8.—
Meyer, Dr. M. Wilh., Die ägyptische Finsternis. Geb.	3.—	1.90
Monographien unserere Haustiere: Bd. I Schumann, Kaninchen; Bd. II Schuster, Hauskatze; Bd. III Morgan, Hund; Bd. IV Schwind, Haushuhn à	1.40	1.05
Sauer, Prof. Dr. A., Mineralkunde. Gebunden .	13.60	12.20
Schrader, Liebesleben der Tiere. Broschiert . . .	1.40	1.10
Schroeder-Rothe, Handbuch f. Naturfreunde. Bd. I geb.	4.20	3.60
„ — „ — „ II „	3.80	3.30
Schwind-Gemen, Rosenbüchlein. Gebunden . . .	1.50	1.25
Stevens, Frank, Ausflüge ins Ameisenreich. Geb.	2.50	1.85
„ „ **Die Reise ins Bienenland.** Geb.	2.50	1.85
Strandbüchlein. Gebunden	1.25	1.—
Stridde, Allgemeine Zoologie. Gebunden	7.—	6.20
Thompson, E. S., Bingo u. a. Tiergeschichten. Geb.	4.80	3.60
„ **Prärietiere und ihre Schicksale.** Fein gebunden	4.80	3.60
„ **Tierhelden.** Fein gebunden	4.80	3.60
Wurm, Waldgeheimnisse. Gebunden	4.80	3.60

und zahlreiche andere Werke mehr.

Die ordentlichen Veröffentlichunge

der früheren Jahre stehen den Mitgliedern, solange Vorrat vorhanden, zu Ausnahmepreisen zur Verfügung:

: 1904 : (Handweiser vergriffen) zusammen für M 4.– (Preis für Nichtmitglieder M 5.–), geb. für M 6.20 (für Nichtmitglieder M 8.40):

Bölsche, W., Abstammung des Menschen.
Meyer, Dr. M. Wilh. (Urania-Meyer), Weltuntergang.
Zell, Dr. Th., Ist das Tier unvernünftig? (Doppelband.)
Meyer, Dr. M. Wilh., Weltschöpfung.

: 1905 : (Handweiser vergriffen) zusammen für M 4.– (Preis für Nichtmitglieder M 5.–), geb. für M 6.75 (für Nichtmitglieder M 9.–):

Bölsche, W., Stammbaum der Tiere.
Welten, Die Sinne der Pflanzen.
Zell, Dr. Th., Tierfabeln.
Teichmann, Dr. E., Leben und Tod.
Meyer (Urania), Sonne und Sterne.

: 1906 : ungebunden zusammen M 4.80 (für Nichtmitglieder M 7.80) und gebunden für M 7.55 * (für Nichtmitglieder M 11.80):

Welten, Wie die Pflanzen lieben.
Meyer, Dr. M. Wilh., Rätsel d. Erdpole.
Zell, Dr. Th., Streifzüge durch d. Tierwelt.
Bölsche, Wilh., Im Steinkohlenwald.
Ament, Dr. W., Die Seele des Kindes.

: 1907 : ungebunden zusammen M 4.80 (für Nichtmitglieder M 7.80) und gebunden für M 7.55 * (für Nichtmitglieder M 11.80):

Kuhlmann, Aus der Wunderwelt des Wassertropfens.
Zell, Dr. Th., Straußenpolitik.
Meyer, Dr. M. W., Kometen u. Meteore.
Teichmann, Dr. E., Fortpflanzung und Zeugung.
Floericke, Dr. K., Die Vögel des deutschen Waldes.

: 1908 : ungebunden zusammen M 4.80 (für Nichtmitglieder M 7.80) und gebunden für M 7.55 * (für Nichtmitglieder M 11.80):

Meyer, Dr. M. W., Erdbeben u. Vulkane.
Teichmann, Dr. E., Die Vererbung.
Sajó, Krieg u. Frieden im Ameisenstaat.
Dekker, Naturgeschichte des Kindes.
Floericke, Dr. K., Säugetiere des deutschen Waldes.

: 1909 : ungebunden zusammen M 4.80 (für Nichtmitglieder M 7.80) und gebunden für M 7.55 * (für Nichtmitglieder M 11.80):

Unruh, Leben mit Tieren.
Meyer, Dr. M. Wilh., Der Mond.
Sajó, Prof. K., Die Honigbiene.
Floericke, Kriechtiere u. Lurche Deutschl.
Bölsche, Wilh., Der Mensch in der Tertiärzeit und im Diluvium.

: 1910 : ungebunden zusammen M 4.80 (für Nichtmitglieder M 7.80) und gebunden für M 7.55 * (für Nichtmitglieder M 11.80):

Koelsch, Pflanzen zwisch. Dorf- u. Trift.
Dekker, Fühlen und Hören.
Meyer, Welt der Planeten.
Floericke, Säugetiere fremder Länder.
Weule, Kultur der Kulturlosen.

: 1911 : ungebunden zusammen M 4.80 (für Nichtmitglieder M 7.80) und gebunden für M 7.55 * (für Nichtmitglieder M 11.80):

Koelsch, Durch Heide und Moor.
Dekker, Sehen, Riechen und Schmecken.
Bölsche, Der Mensch der Pfahlbauzeit.
Floericke, Vögel fremder Länder.
Weule, Kulturelemente der Menschheit.

: 1912 : ungebunden zusammen M 4.80 (für Nichtmitglieder M 7.80) und gebunden für M 7.55 * (für Nichtmitglieder M 11.80):

Gibson-Günther, Was ist Elektrizität?
Dannemann, Wie uns. Weltbild entstand.
Floericke, Kriechtiere u. Lurche fremder Länder.
Weule, Die Urgesellschaft und ihre Lebensfürsorge.
Koelsch, Würger im Pflanzenreich.

* *Sämtlichen Jahrgängen außer 1904 u. 1905 werden die 12 Hefte des betr. Handweiser-Jahrganges beigefügt.*

Die sämtlichen noch vorhandenen Jahrgänge der Kosmos-Veröffentlichungen (s. obige Zusammenstellung) liefern wir an Mitglieder: geheftet für M 35.50 (Preis für Nichtmitgl. 64.80), gebunden (auch Handweiser) für 58.50 (Preis für Nichtmitgl. M 104.80) **auch gegen kleine monatliche Ratenzahlungen.**

*) Wird auch der Handweiser gebunden gewünscht, so erhöht sich der Preis um 85 Pf.

UNIVERSITY OF CALIFORNIA
LIBRARY

Due two weeks after date.

APR 27 1917

30m-7,'12

Flo… Lebe…

Eine eingehende …
der Heimat, von …

Band I u. II v. R. H. Francé

I.: Naturgeschichte d. Algen, Pilze und Moose. II.: Das Leben der Farne, die Blütepflanzen, die bedecktsamigen Blütepflanzen, die Zweikeimblättrigen. (I. Tl.)

In Halbleder je Mark 15.—

Viele Illustrationen
Schöne Kunsttafeln

…chse …esen

…. Ad. Koelsch

…auten, Klee… …en u. Malven, …Enzian, Him… …nd Beifuß… …der Rest der …r. Pflanzen.

…gegen …sraten …4 Mark …, 5 Frs.

Francé und Koel… …e

erste d… …ra

in der allgemein verst… …schen Gegenstücks: Brehms … und nützliche Werk fand in allen Kreisen die begeistertste Aufnahme, es ist wirklich ein unentbehrliches Handbuch

für alte u. junge Naturfreunde

Prospekt kostenlos von der Franckh'schen Verlagshandlung, Stuttgart.